



ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE SEMICONDUTORES DE POTÊNCIA

Philippe Rollemberg d'Egmont

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadores: Fernando Pereira Duda

Carolina Palma Naveira Cotta

Rio de Janeiro


Março de 2019

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE SEMICONDUTORES DE
POTÊNCIA

Philippe Rollemberg d'Egmont

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

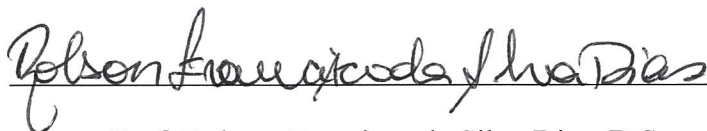
Examinada por:



Prof. Fernando Pereira Duda, D.Sc.



Prof. Carolina Palma Naveira Cotta, D.Sc.



Prof. Robson Francisco da Silva Dias, D.Sc.



Prof. Antônio Guilherme Barbosa da Cruz, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2019

d'Egmont, Philippe Rollemberg

Análise do comportamento térmico de semicondutores de potência. / Philippe Rollemberg d'Egmont. – Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2019.

XVIII, 92 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Fernando Pereira Duda

Carolina Palma Naveira Cotta

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Mecânica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 66-69.

1. IGBT. 2. Análise térmica. I. Duda, Fernando Pereira *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

A Deus, família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pela educação e valores que me foram oferecidos desde cedo e pelo incentivo em continuar aprimorando minha formação, especialmente meu pai, minha mãe e minha tia.

Agradeço aos meus amigos pelas boas conversas e minha namorada Patrícia pelo apoio e incentivo.

Agradeço a todos os professores que, desde a graduação, participaram da minha formação e àqueles que continuam contribuindo com meu aprendizado na pós-graduação. Agradeço aos professores Antônio Guilherme e Robson Dias que contribuíram para o meu aprendizado durante o mestrado. Agradeço especialmente aos professores Fernando Pereira Duda e Carolina Palma Naveira Cotta, pela orientação na realização deste trabalho e pelos ensinamentos e conselhos.

Por fim, agradeço a COPPE / UFRJ e ao Centro de pesquisas da GE no Brasil pelo suporte e apoio fundamental para a realização deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc).

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE SEMICONDUTORES DE POTÊNCIA

Philippe Rollemberg d'Egmont

Março/2019

Orientadores: Fernando Pereira Duda

Carolina Palma Naveira Cotta

Programa: Engenharia Mecânica

Módulos semicondutores de potência do tipo IGBT são amplamente utilizados em diversas indústrias, estes transistores estão presentes em sistemas de controle industrial, sistemas elétricos para indústria de energia solar e energia eólica, em máquinas industriais, tração ferroviária, acionamentos de motor, veículos elétricos híbridos, inversores de potência e em outros dispositivos de comutação de alta potência. Módulos IGBT geram uma quantidade indesejável de calor por meio da dissipação de energia elétrica. A confiabilidade destes dispositivos semicondutores está fortemente ligada às temperaturas de junção operacional dos chips do dispositivo. Ferramentas de simulação são necessários para calcular a temperatura instantânea dos dispositivos sob diferentes condições de carregamento do conversor.

Esta dissertação apresenta uma análise do problema de transferência de calor 3D transiente, baseada no Método dos Elementos Finitos utilizando o software ANSYS, para um dispositivo potência IGBT com diversas camadas de diferentes áreas, materiais e fontes de calor. Dois diferentes casos foram estudados, a saber: condução elétrica e chaveamento, este último é caracterizado pela fonte de calor fortemente dependência do tempo. Foi utilizado um método para suavização deste sinal de energia durante o chaveamento com o intuito de tornar o código numérico mais otimizado.

Os resultados numéricos obtidos são validados com os resultados experimentais, onde os dados experimentais de temperatura utilizados foram obtidos via termografia com uma câmera infravermelha, que fornece uma grande quantidade de medições não intrusivas de toda a superfície externa do módulo IGBT. Uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais foi observada.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc).

THERMAL ANALYSIS OF POWER SEMICONDUCTOR

Philippe Rollemberg d'Egmont

March/2019

Advisors: Fernando Pereira Duda

Carolina Palma Naveira Cotta

Department: Mechanical Engineering

IGBT power semiconductor modules are widely used in various industries, these transistors are present in industrial control system, electrical systems for the solar and wind power industry, industrial machines, railway traction, engine's activation, hybrid electric vehicles, power inverters and other high-power switching devices. IGBT power modules generate an undesirable amount of heat from the dissipation of electric power. The reliability of semiconductor device modules is tightly linked to the operating junction temperatures of the device chips. Clearly, simulation tools are required to compute the instantaneous temperature of the devices under different load conditions of the converter.

This contribution presents a transient 3D heat transfer analysis based on Finite Element Method using ANSYS software, for an IGBT power device with many layers of varying cross-sectional areas, different materials and heat sources. Two different cases were investigated, namely electric conduction and switching, which is characterized by strongly time-dependent heat source. A method for smooth out this energy signal during switching was used to make the numerical code more optimized.

Calculated results are validated against experiments, where the experimental temperature data were obtained via thermography with a research-grade infrared camera, which provides a large amount of non-intrusive measurements of the entire external surface of the IGBT module. A good agreement regarding numerical and experimental results was observed.

Conteúdo

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xv
NOMECLATURA	xvi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Revisão Bibliográfica	4
1.2 Organização do trabalho	8
2 EQUAÇÕES DE GOVERNO	9
2.1 Formulação da conservação da energia	9
2.2 Coeficiente de transferência de calor	10
2.3 Termo fonte de calor na comutação.....	13
3 ANÁLISE NUMÉRICA.....	15
3.1 Considerações em elementos finitos.....	15
3.2 Casos estudados	16
3.3 Domínio computacional e propriedades físicas	18
3.3.1 Módulo IGBT Siemens.....	18
3.3.2 Módulo IGBT Semikron.....	20
3.4 Malha de elementos finitos	24
3.4.1 Malha de elementos finitos – Módulo Siemens	24
3.4.2 Malha de elementos finitos – Módulo Semikron	26
3.5 Condições de contorno.....	31
3.5.1 Radiação térmica	31
3.5.1.1. Módulo Siemens	31
3.5.1.2. Módulo Semikron	32
3.5.2 Convecção Natural	33
3.5.2.1. Módulo Siemens	33
3.5.2.2. Módulo Semikron	37
3.6 Fonte térmica	48
3.6.1 Módulo Siemens	48
3.6.1.1. Módulo Semikron	48
4 RESULTADOS	52
4.1 Módulo IGBT Siemens – Condução elétrica.....	52
4.2 Módulo IGBT Semikron - Chaveamento.....	53
5 CONCLUSÕES	64
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
7 ANEXO	70
7.1 EXPERIMENTOS	70
7.1.1 Módulo IGBT Siemens.....	73

7.1.1.1.	Bancada experimental e equipamentos.....	74
7.1.1.2.	Procedimento experimental	76
7.1.1.3.	Resultados experimentais - Siemens.....	77
7.1.2	Módulo IGBT Semikron.....	81
7.1.2.1.	Bancada experimental e equipamentos.....	81
7.1.2.2.	Procedimento experimental	83
7.1.2.3.	Chaveamento no <i>gate</i>	87
7.1.2.4.	Resultados experimentais - Semikron.....	88

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Componentes do módulo IGBT [11].</i>	2
<i>Figura 2 – Diferentes camadas do módulo IGBT [4].</i>	5
<i>Figura 3 – Três chips IGBTs montados sobre um substrato de cobre [5].</i>	6
<i>Figura 4 – Geometria do modelo do módulo IGBT Siemens aberto.</i>	18
<i>Figura 5 – Vista do corte AA do módulo IGBT Siemens aberto.</i>	19
<i>Figura 6 – Geometria 3D do modelo do módulo IGBT Siemens aberto. A escala de cores descreve os materiais de cada componente.</i>	19
<i>Figura 7 – Geometria CAD do módulo IGBT Semikron e indicação dos materiais do Case (PPA) e da Base (AlSiC).</i>	20
<i>Figura 8 – Geometria CAD do Case (PPA) e do Gel isolante elétrico (Silica Epoxy) e indicação dos materiais constituintes.</i>	21
<i>Figura 9 – Geometria CAD da Base (AlSiC), camada de cobre, isolante térmico (Epoxyd), solda, pads (alumínio), chip IGBT e chip Diodo (Silício) e indicação dos materiais constituintes.</i>	21
<i>Figura 10 – Vista com destaque das camadas do módulo IGBT Semikron.</i>	22
<i>Figura 11 – Geometria do CAD e dimensões do dissipador térmico aletado.</i>	23
<i>Figura 12 – Gráficos de sensibilidade de malha para o modelo Siemens. Erro relativo referente às temperaturas dos modelos 1 a 4.</i>	25
<i>Figura 13 – Gráfico da temperatura máxima global ao longo do tempo para diferentes discretizações temporais para o modelo Siemens.</i>	25
<i>Figura 14 – Malha de elementos finitos usada no modelo da Siemens.</i>	26
<i>Figura 15 – Gráfico de sensibilidade de malha para o modelo Semikron sem dissipador.</i>	27
<i>Figura 16 – Gráfico de sensibilidade da discretização temporal para tempo de 6000 segundos para o modelo Semikron sem dissipador.</i>	27
<i>Figura 17 – Malha utilizada no o modelo numérico do módulo da Semikron sem dissipador.</i>	28
<i>Figura 18 – Gráfico de sensibilidade de malha para o modelo Semikron com dissipador.</i>	29
<i>Figura 19 – Gráfico de sensibilidade da discretização temporal para tempo de 6000 segundos para o modelo Semikron com dissipador.</i>	29

<i>Figura 20 – Malha utilizada no modelo numérico do módulo da Semikron com dissipador.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 21 – Faces do módulo Siemens com emissividade de 0,97.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 22 – Faces do módulo Siemens com emissividade de 0,05.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 23 – Superfícies do módulo Semikron sem dissipador com diferentes emissividades.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 24 – Superfícies do módulo Semikron com dissipador com diferentes emissividades.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 25 – Superfícies voltadas para cima, destacadas em amarelo, do módulo IGBT Siemens.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 26 – Variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura das superfícies voltadas para cima do módulo Siemens.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 27 – Superfícies voltadas para cima, destacadas em amarelo, do módulo IGBT Siemens.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 28 – Variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura das superfícies verticais do módulo Siemens.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 29 – Superfície voltada para baixo, destacadas em amarelo, do módulo IGBT Siemens.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 30 – Variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura da superfície voltada para baixo do módulo Siemens.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 31 – Superfícies voltadas para cima, destacadas em vermelho, do módulo Semikron sem dissipador.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 32 – Variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura das superfícies voltadas para cima do módulo Semikron sem dissipador.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 33 – Superfícies verticais, destacadas em vermelho, do módulo Semikron sem dissipador.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 34 – Variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura das superfícies verticais do módulo Semikron sem dissipador.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 35 – Superfícies voltadas para baixo, destacadas em vermelho, do módulo Semikron sem dissipador.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 36 – Variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura das superfícies voltadas para baixo do módulo Semikron sem dissipador.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 37 – Superfícies voltadas para cima, destacadas em vermelho, do módulo Semikron com dissipador.</i>	<i>42</i>

<i>Figura 38 – Variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura das superfícies voltadas para cima do módulo Semikron com dissipador.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 39 – Superfícies verticais, destacadas em vermelho, do módulo Semikron com dissipador.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 40 – Variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura das superfícies verticais do módulo Semikron com dissipador.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 41 – Superfícies voltadas para baixo, destacadas em vermelho, do módulo Semikron com dissipador.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 42 – Variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura das superfícies voltadas para baixo do módulo Semikron com dissipador.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 43 – Região onde a potência é dissipada no módulo SIEMENS.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 44 – Região da aplicação da potência dissipada nas simulações 1, 2 e 3.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 45 – Potência dissipada real ao longo do tempo de 5 milissegundos.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 46 – Potência dissipada real durante o período de desligamento da chave.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 47 – Resultado da distribuição de temperatura no modelo do módulo IGBT no instante de tempo 2342 s.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 48 – Comparação entre os resultados do modelo térmico e experimental dos valores de temperatura máxima global ao longo do tempo.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 49 – Temperatura máxima no módulo IGBT Semikron sem dissipador ao longo de cinco milissegundos para o Caso 1 de chaveamento.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 50 – Distribuição da temperatura no módulo IGBT Semikron sem dissipador no instante 6000 segundos para o Caso 2.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 51 – Distribuição de temperatura na base do módulo IGBT Semikron sem dissipador no instante 6000 segundos para o Caso 2.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 52 – Comparação ao longo dos 6000 segundos da temperatura média na superfície da base do módulo IGBT Semikron sem dissipador obtido pelo Caso 2 e pela câmera termográfica no experimento Semikron.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 53 – Temperatura máxima global durante o período de 6000 segundos no módulo Semikron com dissipador.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 54 – Perfil de temperatura no módulo Semikron com dissipador no instante 6000 segundos.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 55 – (a) Plano de corte 1, (b) Perfil de temperatura na região do plano de corte 1 no instante 6000 segundos no módulo Semikron com dissipador.</i>	<i>58</i>

<i>Figura 56 – (a) Plano de corte 2. (b) Perfil de temperatura na região do plano de corte 2 no instante 6000 segundos no módulo Semikron com dissipador.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 57 – (a) Plano de corte 3. (b) Perfil de temperatura na região do plano de corte 3 no instante 6000 segundos no módulo Semikron com dissipador.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 58 – Perfil de temperatura no chip IGBT do módulo Semikron com dissipador no instante 6000 segundos.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 59 – Perfil de temperatura nas placas de cobre do módulo Semikron com dissipador no instante 6000 segundos.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 60 – Perfil de temperatura na base do módulo Semikron com dissipador no instante 6000 segundos.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 61 – Perfil de temperatura no dissipador aletado do módulo Semikron com dissipador no instante 6000 segundos – vista 1.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 62 – Perfil de temperatura no dissipador aletado do módulo Semikron com dissipador no instante 6000 segundos – vista 2.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 63 – Ilustração do espectro eletromagnético.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 64 – Câmara de infravermelhos de FLIR modelo A645Sc25°.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 65 – O módulo IGBT (Siemens BSM 50GB 120DN2 módulo duplo) aberto, depois de desconectado da caixa plástica (a) e diagrama do circuito da unidade IGBT (b). As unidades IGBTs estão circulados em vermelho e os diodos estão circulados em verde.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 66 – Bancada experimental e em detalhe o módulo IGBT aberto e pintado.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 67 – O modulo IGBT aberto destacando a área designada para análise das medições.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 68 – Temperatura máxima na superfície da unidade IGBT ao longo do tempo para os casos experimentais 1, 2 e 3.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 69 – Pontos das máximas e mínimas temperaturas identificados por meio das imagens infravermelhas em tempos diferentes no caso experimental 3.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 70 – Bancada experimental e componentes elétricos usados nos experimentos do Módulo Semikron.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 71 – (A) a unidade IGBT inteira. (B) vista explodida da unidade. (C) vista de cima da base metálica e os componentes elétricos (D) diagrama do circuito e componentes elétricos usados nos experimentos.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 72 – Fluxograma ilustrativo do procedimento experimental.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 73 – Características da forma de onda (pulso quadrado) de tensão no gate V_{GE}.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 74 – As temperaturas máximas (A), médias (B), e mínimas (C) da série 1.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 75 – As temperaturas máximas (A), médias (B), e mínimas (C) da série 2.....</i>	<i>91</i>

Figura 76 – As temperaturas máximas (A), médias (B), e mínimas (C) da série 3..... 92

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Faixas de validade do número de Rayleigh apresentadas por [21], [22] e [23].</i>	11
<i>Tabela 2 – Diferentes configurações experimentais com seus parâmetros correspondentes.</i>	16
<i>Tabela 3 – Característica dos Pulsos de Disparos e do Driver.</i>	17
<i>Tabela 4 – Propriedades dos diferentes materiais empregadas no modelo Siemens. ...</i>	19
<i>Tabela 5 – Propriedades dos diferentes materiais empregadas no modelo Semikron.</i>	23
<i>Tabela 6 – Sensibilidade da discretização temporal para o modelo Siemens.</i>	26
<i>Tabela 7 – Sensibilidade da discretização temporal para o modelo Semikron com dissipador.</i>	30
<i>Tabela 8 – Detalhamento das superfícies voltadas para cima do módulo Siemens e seus respectivos coeficientes de transferência de calor.</i>	34
<i>Tabela 9 – Detalhamento das superfícies verticais do módulo Siemens e seus respectivos coeficientes de transferência de calor.</i>	35
<i>Tabela 10 – Detalhamento da superfície voltada para baixo do módulo Siemens e seu respectivo coeficiente de transferência de calor.</i>	37
<i>Tabela 11 – Detalhamento das superfícies voltadas para cima do módulo Semikron sem dissipador e seus respectivos coeficientes de transferência de calor.</i>	38
<i>Tabela 12 – Detalhamento das superfícies verticais do módulo Semikron sem dissipador e seus respectivos coeficientes de transferência de calor.</i>	40
<i>Tabela 13 – Detalhamento das superfícies voltadas para baixo do módulo Semikron sem dissipador e seus respectivos coeficientes de transferência de calor.</i>	41
<i>Tabela 14 – Detalhamento das superfícies voltadas para cima do módulo Semikron com dissipador e seus respectivos coeficientes de transferência de calor.</i>	43
<i>Tabela 15 – Detalhamento das superfícies verticais do módulo Semikron com dissipador e seus respectivos coeficientes de transferência de calor.</i>	45
<i>Tabela 16 – Detalhamento das superfícies voltadas para baixo do módulo Semikron e seus respectivos coeficientes de transferência de calor.</i>	47
<i>Tabela 17 – Potência dissipada adotada para os casos de chaveamento simulados.</i>	49
<i>Tabela 18 – Especificações técnicas da câmera A645Sc25°</i>	73
<i>Tabela 19 – Tensão aplicada e potência gerada em cada caso experimental 1-3.</i>	77
<i>Tabela 20 – Parâmetros dos Experimentos.</i>	86

NOMECLATURA

c	Calor específico do material
C_l	Parâmetro laminar para placas voltadas para cima
C_t^U	Parâmetro turbulento para placas voltadas para cima
d	Ciclo de trabalho
\mathbf{D}	Tensor condutividade térmica
f_c	Frequência de chaveamento
h	Coefficiente de transferência de calor
H_l	Parâmetro laminar para placas voltadas para baixo
\mathbf{I}	Tensor Identidade
I_C	Corrente elétrica no coletor
I_{CE}	Corrente elétrica coletor-emissor
I_{off}	Corrente elétrica quando a chave está desligada
I_{on}	Corrente elétrica quando a chave está ligada
k	Condutividade térmica do material
k_{ar}	Condutividade térmica do ar
L	Comprimento característico
m	Parâmetro experimental
\mathbf{n}	Vetor unitário
Nu	Número de Nusselt
Nu_l	Número de Nusselt laminar
Nu_m	Número de Nusselt médio
Nu_t	Número de Nusselt turbulento
Nu^T	Número de Nusselt da camada fina laminar

P	Potência dissipada
P_{off}	Potência dissipada ao desligar a chave
P_{on}	Potência dissipada ao ligar a chave
Pr	Número de Prandt
P_t	Média da potência dissipada durante o chaveamento
Q	Fonte térmica de calor
\mathbf{q}	Vetor fluxo de calor
q_a	Fluxo de calor prescrito
q_c	Fluxo de calor convectivo
q_r	Fluxo de calor por radiação
Ra	Número de Reyleigh
R_G	Resistência do <i>gate</i>
S	Área
s	Superfície
t	Tempo
t_{on}	Tempo subida ao ligar a chave
t_{off}	Tempo subida ao desligar a chave
T	Temperatura
\bar{T}	Temperatura prescrita
T_0	Temperatura inicial
T_a	Temperatura avaliada
T_{ex}	Temperatura do meio externo
T_n	Temperatura no instante n
T_{n+1}	Temperatura no instante $n+1$
\dot{T}_{n+1}	Derivada temporal da temperatura no instante $n+1$

T_{ref}	Temperatura de referência
T_s	Temperatura da superfície
V	Volume
V_{CE}	Tensão entre o coletor e emissor
$V_{G(on)}$	Tensão positiva do pulso (disparo)
$V_{G(off)}$	Tensão negativa do pulso (bloqueio)
V_{GE}	Tensão entre o <i>gate</i> e emissor
w	Função teste
\mathbf{x}	Vetor posição

Letras gregas

Γ_q	Fronteira do domínio onde há fluxo de calor
Γ_T	Fronteira do domínio onde há temperatura conhecida prescrita
ε	Emissividade
ρ	Massa específica
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
τ_s	Tempo de chaveamento
Ω	Domínio

1 INTRODUÇÃO

Dispositivos semicondutores, como IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) e diodos, são elementos fundamentais em sistemas de conversão de energia elétrica, esses operam como interruptores de alimentação. Estes dispositivos são amplamente utilizados em diversas áreas da indústria, são utilizados, por exemplo, no acionamento do motor de veículos elétricos e híbridos, acionamento ferroviário e fontes chaveadas de alta potência de plataforma de petróleo, por sua capacidade de suportar valores elevados de corrente elétrica e de alta frequência de chaveamento.

A circulação de corrente elétrica nestes dispositivos envolve dissipação de energia na forma de calor como consequência do efeito Joule. A energia dissipada provoca um aumento na temperatura interna do semicondutor. Este tópico tem sido abordado em diversos estudos apresentados na literatura [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7].

Entre os efeitos indesejáveis referente ao aumento de temperatura em um dispositivo semicondutor, pode-se destacar variações da tensão limiar, o aumento da corrente de fuga e do tempo de comutação [2]. Por esta razão a temperatura interna em um dispositivo semicondutor não pode ultrapassar um valor máximo pré-estabelecido, conhecido como temperatura de junção. Em adição, considerando que módulos IGBTs são encapsulamentos compostos de várias camadas de materiais, incluindo chips IGBTs e diodos (ver Figura 1), outra ação deletéria do auto aquecimento causado pelo efeito Joule decorre das tensões térmicas que surgem devido a não homogeneidade da expansão térmica provocada, não apenas, pelos diferentes coeficientes de dilatação dos materiais que compõem o módulo IGBT, mas também, pelos elevados gradientes de temperatura que podem surgir durante seu funcionamento. Estas tensões podem resultar na falha mecânica em operação, incluindo falha por fadiga após certo número de ciclos térmicos [8, 9, 10, 11].

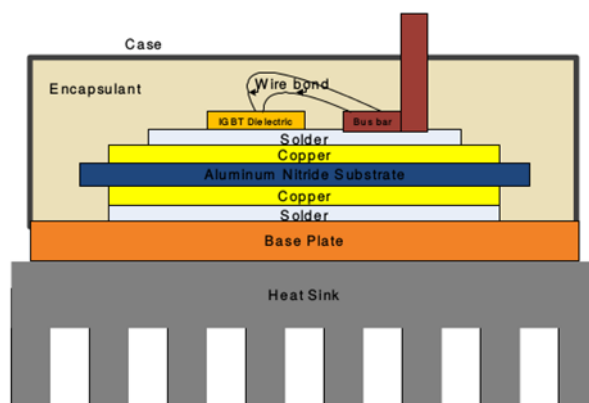


Figura 1 – Componentes do módulo IGBT [11].

A geração de calor indesejada decorrente do efeito Joule em um módulo IGBT pode reduzir drasticamente sua confiabilidade e vida útil. Desta forma, a análise térmica e o gerenciamento térmico são fundamentais para concepção, projeto e análise de módulos IGBTs, visando à eliminação ou mitigação dos danos causados pelo mencionado efeito.

Informações obtidas através de uma análise térmica podem ser usadas, por exemplo, para aumentar a confiabilidade do dispositivo e dimensionar o sistema de arrefecimento. A análise térmica de um módulo IGBT envolve as seguintes etapas, quais sejam: cálculo da energia dissipada pelo dispositivo e definição do modelo térmico.

O cálculo da energia dissipada em um dispositivo semicondutor requer o conhecimento das formas de onda de corrente e tensão através deste dispositivo. Essas informações podem ser obtidas por meio de medição ou através da solução de um modelo físico-matemático para o dispositivo em questão. A primeira opção, no entanto, através da medição não invasiva no módulo IGBT não é uma tarefa fácil [9]. No âmbito do modelo físico-matemático, duas alternativas podem ser empregadas. Na primeira, expressões analíticas para as perdas de potência em condições idealizadas de funcionamento são obtidas. Já a segunda alternativa consiste na utilização de ferramentas

de simulação de circuito para obter o perfil de perdas de energia. A vantagem da simulação reside na possibilidade de obtenção de estimativas para as perdas de potência em condições gerais de operação. Modelos para IGBTs podem ser classificados nas seguintes categorias: modelos físico-matemáticos e modelos empíricos (uma revisão detalhada sobre diversos tipos de modelos para IGBTs pode ser encontrada em [12]). Os modelos da primeira categoria são baseados na física do dispositivo e possuem uma elevada precisão. Um grande desafio para essa classe de modelos é resolver, de modo eficiente, as escalas temporais envolvidas. A resolução temporal capaz de capturar tanto o ciclo do circuito de potência quanto os detalhes do regime transiente pode tornar o custo computacional, necessário para a obtenção do perfil de perdas de energia, proibitivamente elevado. Uma alternativa é usar modelos empíricos desenvolvidos para dispositivos específicos. Neste caso, o mecanismo físico detalhado de um dispositivo não é considerado. Métodos de ajuste de curvas e de interpolação são usados para extrair os parâmetros do modelo a partir de dados fornecidos pelo fabricante. Seja como for, a energia dissipada nos dispositivos semicondutores é convertida em calor, que por sua vez provoca aquecimento no módulo IGBT, cuja descrição é objeto do modelo térmico.

A condução de calor em módulos IGBTs envolve não apenas os semicondutores, mas também o encapsulamento como um todo e o sistema de arrefecimento. O problema resultante requer a solução da equação do calor em uma estrutura complexa e de múltiplas camadas e materiais. Portanto, a descrição do comportamento térmico em um módulo IGBT é geralmente baseada em métodos numéricos tais como o método dos elementos finitos e o método das diferenças finitas. Esse tipo de análise fornece, por exemplo, as seguintes informações para análise térmica: distribuição de temperatura no interior do módulo, a localização de *hotspot*, e a variação de temperatura nos dispositivos. Em algumas situações, soluções analíticas podem ser obtidas para a equação do calor. Neste

caso, a estrutura do módulo IGBT e as condições de contorno e iniciais são simplificadas. A análise térmica pode ser feita explorando a analogia elétrica do problema de condução de calor. Essa classe de modelos térmicos é bastante popular uma vez que podem ser implementados em simuladores de circuito existentes. Os parâmetros da rede térmica podem ser obtidos através do uso de dados experimentais ou de resultados de modelos numéricos [9].

Cabe ressaltar que o comportamento elétrico e térmico de um módulo IGBT estão acoplados entre si, entretanto dependendo dos parâmetros operacionais, como frequência de chaveamento, o resolver o problema elétrico e o térmico separados apresenta-se como uma boa aproximação. Para uma discussão atualizada dos desafios inerentes a modelagem do acoplamento eletro-térmico ver [13,14].

1.1 Revisão Bibliográfica

Em [8] e [9] um modelo eletro-térmico para módulos IGBTs é desenvolvido. Com o intuito de criar um ambiente de simulação em tempo real, os critérios adotados na escolha das parcelas térmicas e elétricas do modelo foram: facilidade de implementação na plataforma SIMULINK e tempo de resposta. Em particular, as equações para as perdas de condução e comutação foram derivadas a partir do ajuste de dados experimentais. Explorando a analogia elétrica do problema de condução de calor, um circuito RC foi construído para realização da análise térmica, sendo os parâmetros correspondentes extraídos das curvas de impedância térmica. Estas, por sua vez, foram obtidas através do uso de dados experimentais e de simulações numéricas realizadas na plataforma comercial ANSYS. Os resultados numéricos e experimentais foram confrontados apresentando uma boa concordância. A rede térmica RC foi implementada no ambiente SIMULINK para o uso em um simulador em tempo real. Cumpre ressaltar que as análises

elétrica e térmica são executadas de maneira desacoplada. Em particular, a temperatura nos semicondutores é mantida fixa durante o cálculo das perdas enquanto que a análise térmica é considerada para estimar a temperatura de junção em tempo real.

A referência [4] apresenta um estudo numérico e experimental para o módulo IGBT esquematizado na Figura 2. O estudo tem como objetivo investigar o efeito de temperatura devido a distribuição não homogênea de densidade de corrente e aquecimento por efeito Joule do chip IGBT durante o carregamento elétrico. Um modelo 3D do módulo de potência foi feito no Software ANSYS. Observa-se que o fenômeno elétrico acontece em todos os componentes localizados acima do substrato cerâmico, que por sua vez funciona como isolante elétrico. Já o fenômeno térmico ocorre em todos os componentes do modelo.

Os resultados da análise indicam que a densidade de corrente máxima ocorre na interface entre o *pad* e o fio de alumínio, a qual pode induzir falha por eletromigração em operações em longo prazo. Os resultados deste estudo indicam a capacidade da análise numérica para prever, de modo eficiente, os comportamentos elétricos e térmicos em módulos IGBT.

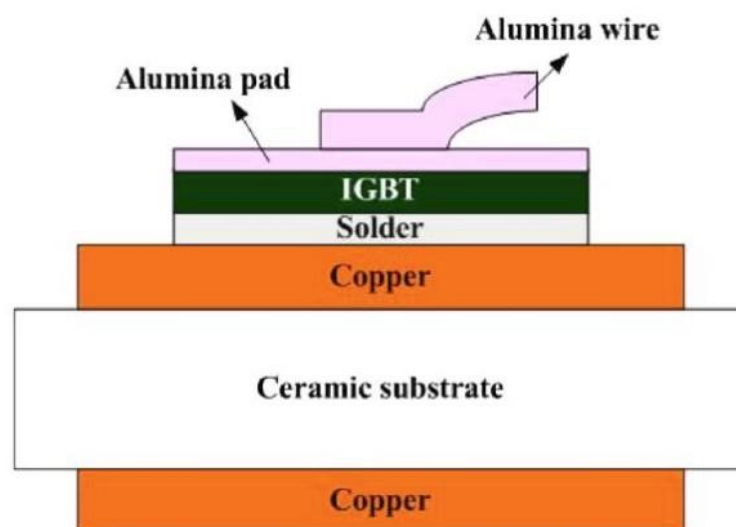


Figura 2 – Diferentes camadas do módulo IGBT [4].

Um modelo eletro-térmico acoplado para um módulo IGBT foi apresentado em [5]. Neste caso, a configuração adotada para análise consiste em três chips IGBT montados sobre um substrato de cobre, conforme ilustrado na Figura 3. A análise numérica foi baseada no método das diferenças finitas. De acordo com os autores, o modelo resultante está apto para uso em simuladores de circuito permitindo uma caracterização mais precisa e aprofundada de módulos IGBT montados.

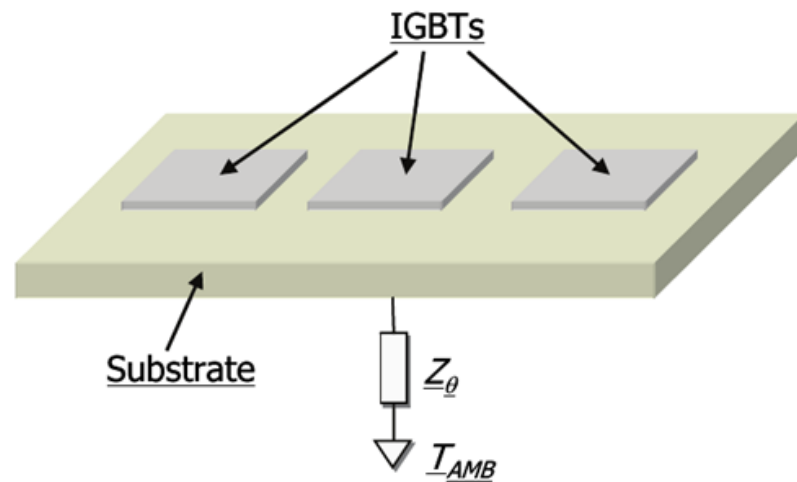


Figura 3 – Três chips IGBTs montados sobre um substrato de cobre [5].

O comportamento térmico do módulo IGBT foi abordado em [6]. Resultados experimentais e da simulação indicaram a formação e crescimento de vazios e trincas entre as camadas, essencialmente nas soldas. Verificou-se que a falha do chip está relacionada com o rompimento/derretimento dos fios devido às altas temperaturas e a distribuição não uniforme de temperatura. Portanto, os estudos indicaram que a falha térmica é o principal fenômeno que afeta a confiabilidade do módulo IGBT.

Em [15], um modelo matemático para o problema de dissipação de calor com geração simultânea de calor em um módulo IGBT foi desenvolvido. O modelo é baseado na equação de difusão ambipolar para descrição do problema elétrico enquanto que para

a parte térmica duas abordagens foram consideradas, uma unidimensional, na qual a solução da equação do calor é resolvida para várias camadas de materiais diferentes. Já na segunda abordagem modelo térmico é bidimensional e a solução numérica foi encontrada pelo método das diferenças finitas.

O desenvolvimento de um modelo térmico analítico para simulações térmicas de módulos de dispositivos de potência foi apresentado em [16]. A solução baseada em series de Fourier foi usada para resolver a equação de calor em duas dimensões. O modelo foi validado usando o pacote de simulação FLOTHERM – software de simulação 3D para o projeto térmico de sistemas eletrônicos, sendo baseada na técnica solução numérica de volume finitos. Os exemplos mostrados foram para um pacote de IGBT/diodo genérico. O chip IGBT de silício é montado em cima da camada de Alumínio que é fixada sobre outras camadas com solda. Uma camada de pasta térmica é usada entre a placa base e o dissipador de calor. A energia dissipada é obtida por meio de um simulador elétrico e considerada através da prescrição do fluxo de calor correspondente na fronteira [17, 18, 19, 20]

Na literatura não foi encontrado um trabalho que considerasse um módulo IGBT modelado com todos os seus componentes 3D e com diferentes coeficientes de transferência de calor dependente da temperatura para cada superfície do módulo. Neste trabalho, uma abordagem do problema térmico em semicondutores é apresentada a partir de análise numérica, onde uma análise transiente de um modelo tridimensional com multicamadas com diferentes materiais é desenvolvida, além disso, correlações empíricas são utilizadas para a modelagem da convecção natural, perda de calor por radiação e diferentes condições de operação foram consideradas, a saber, condução elétrica e chaveamento.

1.2 Organização do trabalho

O trabalho é dividido em 5 partes. Na parte inicial é feita uma introdução ao assunto e uma revisão bibliográfica e são apresentados motivações, resultados pretendidos e organização.

O capítulo 2 descreve a fundamentação teórica utilizada para modelagem térmica do semicondutor, além de uma descrição do método numérico utilizado para obter a solução das equações.

O capítulo 3 apresenta as considerações em elementos finitos, como formulação fraca, condições de contorno, domínio computacional e malha de elementos finitos.

O capítulo 4 apresenta os resultados do comportamento térmicos de dois módulos IGBTs, submetidos a diferentes condições elétricas, a saber: condução elétrica constante e chaveamento.

O capítulo 5, por fim, expõe as conclusões desta dissertação e trabalhos futuros.

2 EQUAÇÕES DE GOVERNO

2.1 Formulação da conservação da energia

Os efeitos térmicos em dispositivos semicondutores, operando em condições não isotérmicas, podem ser contabilizados com a utilização da descrição matemática da condução térmica transiente proveniente da conservação de energia e da lei de Fourier. Onde é considerada uma região 3D sólida em que possui um domínio Ω com contorno $\partial\Omega = \Gamma_T \cup \Gamma_q$, onde Γ_T e Γ_q representam a fronteira do contorno $\partial\Omega$ onde uma temperatura \bar{T} conhecida é prescrita e a fronteira do contorno $\partial\Omega$ onde há fluxo de calor, respectivamente.

$$\rho c (\partial T / \partial t) + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q, \quad \mathbf{q} = -\mathbf{D} \nabla T \quad \text{em } \Omega \quad (1)$$

resolvida com condições iniciais e de contorno apropriadas,

$$T = \bar{T} \quad \text{em } \Gamma_T \quad \text{para } t > 0, \quad (2)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_a + q_c + q_r \quad \text{em } \Gamma_q, \quad \text{para } t > 0, \quad (3)$$

$$T(\mathbf{x}, t = 0) = T_0(\mathbf{x}) \quad \text{em } \Omega, \quad (4)$$

onde ρ e c são massa específica e calor específico do material a pressão constante, $T(\mathbf{x}, t)$ é o campo de temperatura, \mathbf{q} denota o vetor fluxo de calor, Q é o termo fonte, \mathbf{D} é o tensor condutividade térmica que para materiais isotrópicos é representado por:

$$\mathbf{D} = k\mathbf{I}, \quad (5)$$

onde k é a condutividade térmica do material e \mathbf{I} o tensor identidade. A equação de condição de contorno (2) é a condição onde uma temperatura \bar{T} conhecida é prescrita no contorno Γ_T . A condição de contorno referente a equação (3) representa um fluxo de calor aplicado q_a , convectivo q_c e por radiação q_r , no contorno Γ_q com o vetor normal unitário, \mathbf{n} , exterior ao contorno $\partial\Omega$, onde:

$$q_c = h(T_s - T_{ex}) \quad (6)$$

$$q_r = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{ex}^4) \quad (7)$$

O h é o coeficiente de transferência de calor avaliado em $0,5(T_{ex} + T_s)$, sendo T_{ex} a temperatura do meio externo, T_s é a temperatura da superfície, ε é a emissividade e σ é a constante de Stefan-Boltzmann. A equação 4 refere-se à condição inicial, onde T_0 é a temperatura inicial.

O software ANSYS Workbench foi utilizado para a aplicação do método de elementos finitos para obter a solução das equações do modelo apresentado.

2.2 Coeficiente de transferência de calor

Em componentes eletrônicos, como o IGBT, a maior parte do calor é dissipado por condução e convecção. Existem dois tipos de convecção, a forçada e a natural, neste trabalho será considerada a natural uma vez que no experimento de referência, detalhado no Anexo deste trabalho, não há movimento do fluido que circunda os dispositivos estudados, gerado por uma fonte externa. O valor do coeficiente de transferência é utilizado no cálculo das perdas por convecção, esse pode ter o seu valor alterado de forma significativa com a variação da temperatura da superfície que dissipa o calor.

Diferentes correlações envolvendo o coeficiente de transferência de calor foram utilizadas para contabilizar as perdas de calor por convecção natural com o ambiente, essa ocorre quando há uma movimentação do fluido, induzido pela diferença de massa específica causada pela variação de temperatura. Neste trabalho o fluido que circunda o dispositivo é o ar. A perda de calor por convecção natural de um corpo varia em função de sua posição no espaço em relação a direção e sentido da aceleração da gravidade. As geometrias dos dispositivos estudados são complexas e específicas por isso não é encontrado na literatura uma formulação para o valor do coeficiente de transferência de calor do corpo como um todo. A fim de calcular o valor do coeficiente de transferência de calor em todo o contorno do domínio geométrico dos dispositivos estudados, foi necessário subdividi-lo em placas posicionadas de três maneiras diferentes, a saber:

horizontal - voltada para cima, horizontal – voltada para baixo e vertical. A posição horizontal, voltada para cima, representa uma placa em que a normal da face que transfere calor para o fluido que o circunda está na mesma direção e no sentido oposto da aceleração da gravidade. A posição horizontal, voltada para baixo, representa uma placa em que a normal da face que transfere calor para o fluido que o circunda está na mesma direção e no mesmo sentido da aceleração da gravidade. A posição vertical, representa uma placa em que a normal da face que transfere calor para o fluido que o circunda está perpendicular à aceleração da gravidade. As correlações empíricas clássicas da literatura adotadas para cada uma das três posições das placas obtidas por [21], [22] e [23], foram usadas com o objetivo de estimar o coeficiente de transferência de calor. Estas correlações se destacam por serem válidas para um número abrangente de Rayleigh. As faixas de validade do número de Rayleigh são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Faixas de validade do número de Rayleigh apresentadas por [21], [22] e [23].

Referência utilizada	Posicionamento da placa	Faixa de validade do número de Rayleigh
Rohsenow, et al. [21]	Horizontal, voltada para cima.	$1 < Ra < 10^{10}$
Ozisik [22]	Vertical.	$10^{-1} < Ra < 10^{12}$
Kreith, et al [23]	Horizontal, voltada para baixo.	$Ra < 10^{10}$

Os valores de Rayleigh calculados para cada superfície dos módulos IGBTs estudados neste trabalho estão compreendidos nas faixas apresentadas na Tabela 1. Nessa análise o objetivo é obter curvas que relacionam o coeficiente de transferência de calor e temperatura para cada superfície dos módulos IGBTs estudados.

Em placa voltada para cima, são adotadas as seguintes correlações, obtidas por [21]:

$$Nu^T = 0,0835C_l Ra^{\frac{1}{2}}; \quad (8)$$

$$Nu_l = \left(\frac{1,4}{\ln(1 + 1,4/Nu^T)} \right); \quad (9)$$

$$Nu_t = C_t^U Ra^{\frac{1}{3}}; \quad (10)$$

$$Nu = [(Nu_l)^m + (Nu_t)^m]^{\frac{1}{m}}; \quad (11)$$

$$C_t^U = 0,14 \left(\frac{1 + 0,0107}{1 + 0,01Pr} \right); \quad (12)$$

$$C_l = \frac{0,0671}{(1 + (0,492/Pr)^{\frac{9}{16}})^{\frac{4}{9}}}; \quad (13)$$

$$h = Nu \frac{k_{ar}}{L}; \quad (14)$$

onde, h é o coeficiente de transferência de calor, Ra é o número de Rayleigh, Pr é o número de Prandtl, k_{ar} é a condutividade térmica do ar, L é o comprimento característico definido pela razão entre a área e o perímetro da superfície, m é escolhido de modo a fornecer o melhor ajuste aos dados experimentais de [21]. Para uma face com a parte aquecida voltada para cima, m é igual a 10. Nu_t é o valor de Nusselt turbulento, Nu_l é o valor de Nusselt laminar e Nu^T é o número de Nusselt da camada fina laminar. C_t^U , C_l , são parâmetros dependentes do número de Prandtl.

As correlações a seguir são obtidas por [22] para placas posicionadas verticalmente:

$$Nu_m^{\frac{1}{2}} = 0,825 + \frac{0,387Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}}; \quad (15)$$

$$h = Nu_m \frac{k_{ar}}{L}; \quad (16)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor, Ra é o número de Rayleigh, Pr é o número de Prandtl, k_{ar} é a condutividade térmica do ar, L é o valor da altura da placa, Nu_m é o valor de Nusselt médio.

As correlações a seguir são obtidas por [23] para placa voltada para baixo:

$$Nu^T = H_l Ra^{\frac{1}{5}}; \quad (17)$$

$$H_l = \frac{0,527}{(1 + (1,9/Pr)^{\frac{9}{10}})^{\frac{2}{9}}}; \quad (18)$$

$$Nu = \frac{2,45}{\ln(1 + 2,45/Nu^T)}; \quad (19)$$

$$h = Nu \frac{k_{ar}}{L}; \quad (20)$$

Onde h é o coeficiente de transferência de calor, Ra é o número de Rayleigh, Pr é o número de Prandtl, k_{ar} é a condutividade térmica do ar, L é o comprimento característico definido pela razão entre a área e o perímetro da superfície, Nu^T é o número de Nusselt da camada fina laminar e H_l é um parâmetro que depende do número de Prandtl.

2.3 Termo fonte de calor na comutação

O IGBT é um componente comumente utilizado para comutação de cargas de alta corrente em regime de alta velocidade. As perdas provenientes do processo de comutação é um processo transiente que ocorre durante a transição do estado desligado para o estado ligado (*turn on*) e do estado ligado para o estado desligado (*turn off*) do IGBT. O tempo de comutação ocorre na ordem de microssegundos enquanto que os efeitos térmicos ocorrem na ordem de segundos, essa diferença na ordem de grandeza no

tempo torna a solução do problema muito demorada, por isso, para reduzir o custo computacional, a fonte térmica de calor dissipada por efeito Joule, Q , é determinada pela média no tempo (*average smoothing*) da potência dissipada no chip em cada período de chaveamento, segundo [24], na seguinte forma:

$$P_t = \frac{1}{\tau_s} \int_{\tau_s} P dt, \quad (21)$$

onde, τ_s é o tempo de chaveamento e $P = V_{CE} \times I_C$, sendo P a potência dissipada, dada pelo produto da tensão V_{CE} , entre o coletor e emissor, e a corrente elétrica no coletor I_C .

3 ANÁLISE NUMÉRICA

A equação (1) com as condições de contorno (2) e (3) e condição inicial (4) foi resolvida por meio do método de elementos finitos utilizando o software ANSYS Workbench v17.

3.1 Considerações em elementos finitos

O método de elementos finitos (MEF) é uma abordagem numérica em que equações diferenciais parciais podem ser resolvidas de forma aproximada. Neste método, deve-se combinar as funções de forma com a formulação fraca da equação de governo do problema para obter as equações discretas de elementos finitos. No MEF a malha de elementos finitos é gerada a partir da subdivisão do domínio Ω em uma determinada quantidade de elementos finitos. Esta malha de elementos finitos é utilizada para obter uma aproximação da geometria do domínio a ser estudado e para desenvolver as equações de elementos finitos. A formulação fraca apresentada na equação (22) é obtida a partir da forma forte (1) e de suas condições de contorno (2) e (3):

$$\int_{\Omega} w \rho c (\partial T / \partial t) dV + \int_{\Omega} (\nabla w) [\mathbf{D}] \nabla T dV = \int_{\Omega} w Q dV - \int_{\Gamma_q} w (q_a + q_c + q_r) dS, \quad (22)$$

onde w é chamado de função teste ou função de forma. A equação (22) é válida para $\forall w(\mathbf{x})$ com $w = 0$ em Γ_T . Foram utilizados elementos 3D hexaédricos SOLID90 com 20 nós em cada elemento para interpolar a temperatura como o único grau de liberdade em cada nó. Para a discretização temporal, o método de Euler implícito foi utilizado,

$$T_{n+1} = T_n + \Delta t (\dot{T}_{n+1}) \quad (23)$$

A escolha do valor do passo de tempo Δt , se deu a partir do estudo de sensibilidade de discretização temporal, com o objetivo de encontrar um valor de passo de tempo mínimo o suficiente para obter resultados com variação menor que $3 \times 10^{-4} \%$. Além disso, o método de Newton-Raphson foi utilizado para solução do sistema de equações.

3.2 Casos estudados

Neste trabalho são avaliados dois módulos IGBTs diferentes, a saber: o módulo da Siemens BSM 50GB 120 DN2 e Semikron SKM 50GB 123D. Estes módulos foram ensaiados em estudos experimentais realizados no Laboratório de Nano e Microfluídica e Microssistemas (LabMEMS) vinculado ao Programa de Engenharia Mecânica (PEM) da COPPE UFRJ, como mostrado no Anexo deste trabalho.

Foram realizados dois experimentos, um com o Módulo IGBT Siemens no regime de condução elétrica, e outro com o Módulo IGBT da Semikron no regime de chaveamento [25]. A Tabela 2 apresenta as principais características dos experimentos.

Tabela 2 – Diferentes configurações experimentais com seus parâmetros correspondentes.

Experimento	Potência, P (W)	Corrente Coletor, I_C (A)	Tensão Coletor-Emissor, V_{CE} (V)	
Siemens	6,14	4,91	1,25	
Semikron	Dependente do tempo	4,5 (valor médio com <i>Gate</i> fechado)	2 (com <i>Gate</i> fechado)	~ 100 (com <i>Gate</i> aberto)

No experimento Semikron de chaveamento, a potência é dependente do tempo uma vez que a mesma é dependente da corrente elétrica e da tensão que variam em função do tempo. A tensão *Gate-Emissor*, V_{GE} , foi de [15V, -5V], a frequência de chaveamento foi de 500 Hz e o tempo de subida (t_{on}) e de descida (t_{off}) foi de aproximadamente 2000 ns.

Um caso adicional foi realizado com o objetivo de representar um cenário mais próximo das condições reais de operação, neste caso, o dispositivo foi analisado fechado com um dissipador térmico aletado e colocado na posição vertical. Para esta condição não foi possível obter resultados experimentais, assim, uma simulação elétrica foi realizada baseada em condições de operação padrão, a fim de obter o valor do termo fonte. Características do modelo implementado estão apresentadas na Tabela 3. Essas características foram baseadas no *datasheet* do circuito de disparo de chave do módulo IGBT SKHI 20 opA - Semikron e no modelo de Hefner [26,27,28]. Este modelo foi implementado no software *Simplorer*. Ele apresenta precisão satisfatória para uma ampla faixa de operação. Detalhes adicionais sobre a implementação do modelo para o simulador elétrico podem ser obtidos na literatura [29,30].

O circuito de disparo da chave (Driver) foi modelado como uma fonte ideal de pulsos de acordo com as características fornecidas pelo fabricante, juntamente com as resistências do estágio de saída do circuito em série com uma indutância parasita estimada em função do comprimento do par de fios que transmite o sinal de disparo. A Tabela 3 apresenta as características do driver que foram obtidas da folha de dados.

Tabela 3 – Característica dos Pulsos de Disparos e do Driver.

Símbolo	Descrição	Valor	Unidade
$V_{G(on)}$	Tensão positiva do pulso (disparo)	15	V
$V_{G(off)}$	Tensão negativa do pulso (bloqueio)	-8	V
t_{on}	Tempo de subida	550	ns
t_{off}	Tempo de descida	700	ns
d	Ciclo de trabalho	50	%
R_G	Resistência do <i>gate</i>	7,0	Ω
V_{CE}	Tensão coletor-emissor	100	V
f_c	Frequência de chaveamento	1000	Hz

A simulação elétrica forneceu resultado de potência dissipada no chip IGBT do módulo Semikron SKM 50GB 123D, este resultado foi utilizado como entrada no modelo térmico para obter o perfil de temperatura no módulo.

3.3 Domínio computacional e propriedades físicas

No método de elementos finitos, deve-se definir o domínio computacional para posteriormente discretizá-lo em uma malha de elementos finitos. A seguir, o domínio computacional e as propriedades físicas dos componentes dos módulos IGBTs são apresentadas.

3.3.1 Módulo IGBT Siemens

A geometria em CAD do módulo IGBT Siemens aberto sem a presença do *case* e do gel isolante elétrico, usada como domínio computacional, é mostrada da Figura 4 à Figura 6. Os diferentes materiais que constituem os componentes do dispositivo são descritos na escala de cores (Figura 6). As propriedades térmicas dos materiais para uma temperatura ambiente de 25 °C são apresentas na Tabela 4. Os materiais que constituem o módulo IGBT Siemens foram escolhidos conforme [31], e para base do módulo foi adotado o material AlSiC-9 [32].

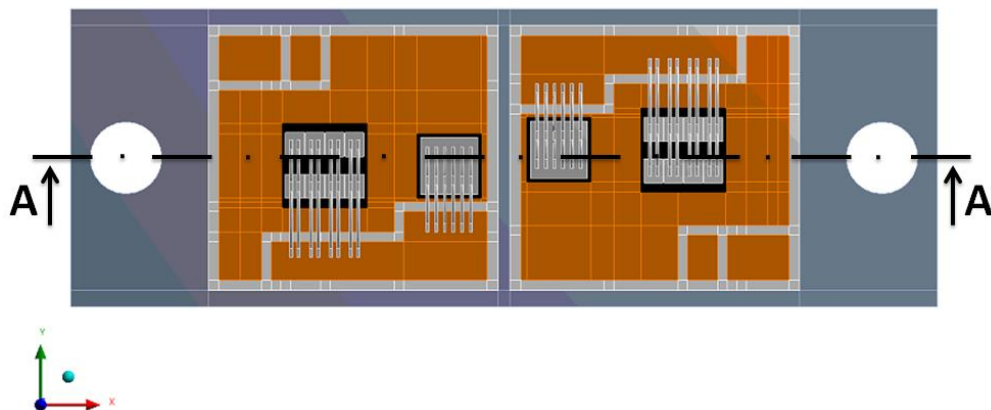


Figura 4 – Geometria do modelo do módulo IGBT Siemens aberto.

3.3.2 Módulo IGBT Semikron

No módulo IGBT Semikron, foram utilizados dois domínios computacionais diferentes, a saber: no primeiro o módulo está fechado na horizontal e no segundo o módulo está fechado e com um dissipador aletado posicionado na vertical. O modelo CAD do módulo Semikron SKM 50GB 123D e suas características geométricas, assim como as propriedades térmicas dos materiais constituintes são empregados no modelo numérico.

Na Figura 7 até a Figura 10 é mostrada a geometria em CAD do módulo IGBT Semikron usada no primeiro domínio computacional e a indicação do material atribuído a cada componente.

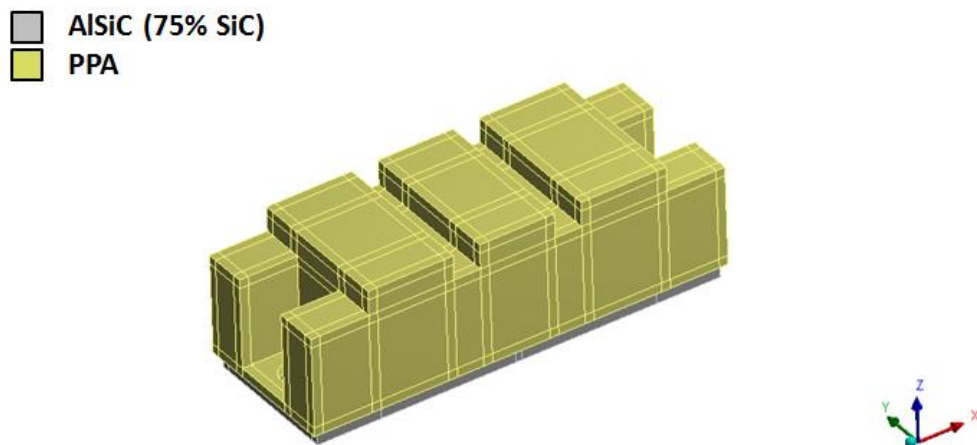


Figura 7 – Geometria CAD do módulo IGBT Semikron e indicação dos materiais do Case (PPA) e da Base (AlSiC).

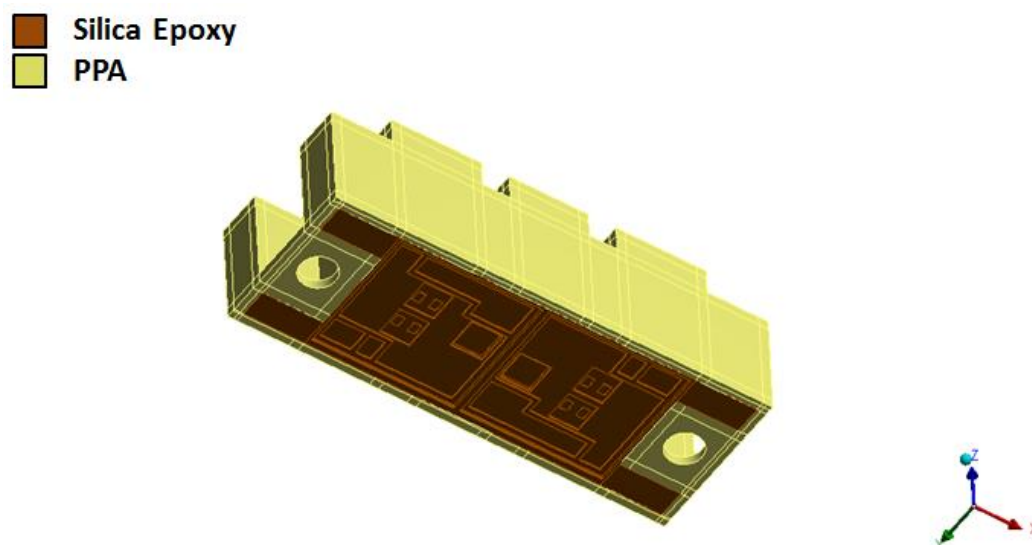


Figura 8 – Geometria CAD do Case (PPA) e do Gel isolante elétrico (Silica Epoxy) e indicação dos materiais constituintes.

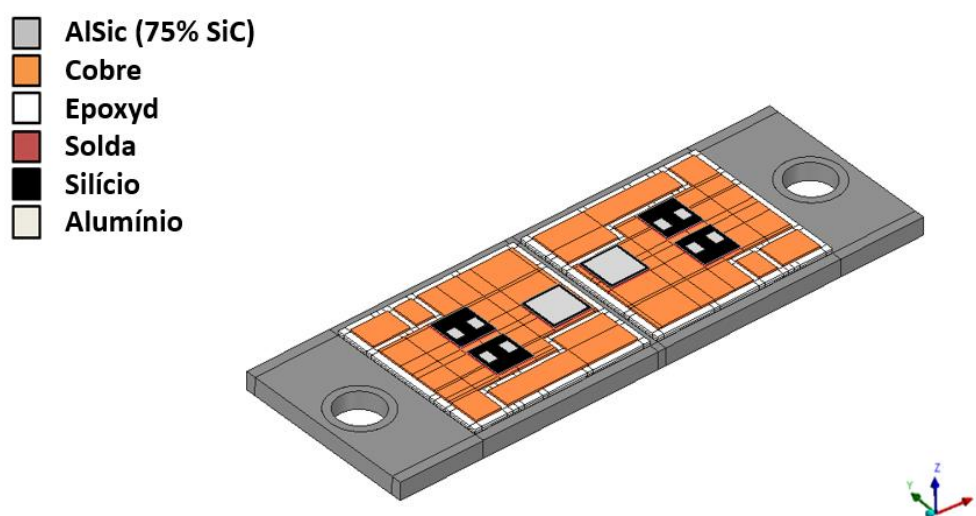


Figura 9 – Geometria CAD da Base (AlSiC), camada de cobre, isolante térmico (Epoxyd), solda, pads (alumínio), chip IGBT e chip Diodo (Silício) e indicação dos materiais constituintes.

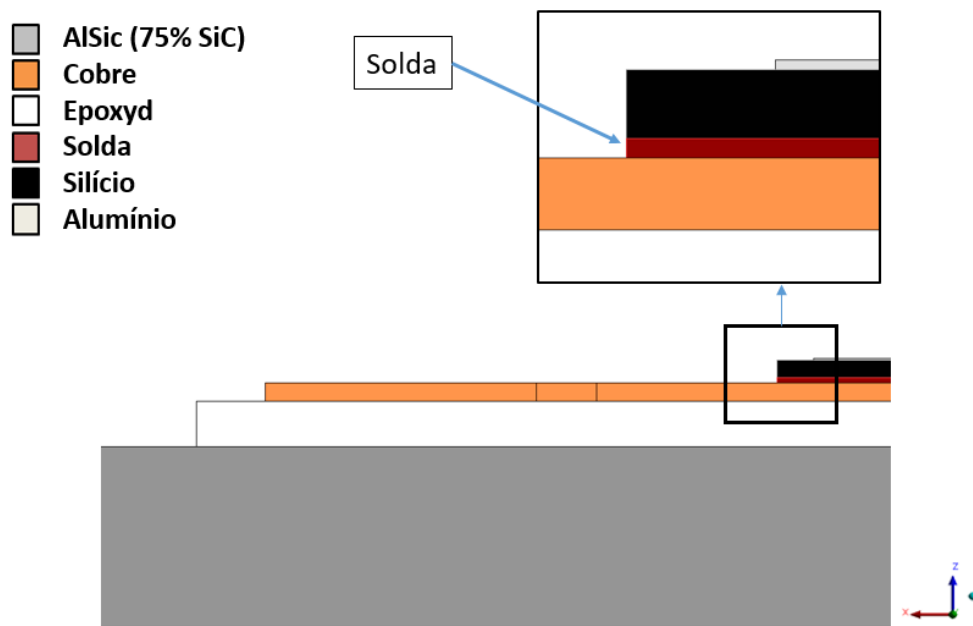


Figura 10 – Vista com destaque das camadas do módulo IGBT Semikron.

No modelo CAD são representadas as soldas, como indicado na Figura 10, a camada de solda é colocada entre os chips IGBT e a camada de cobre e entre os chips diodo e a camada de cobre.

A escolha dos materiais de cada componente do módulo IGBT Semikron, utilizados na simulação, foi baseada em [33]. O material PPA (*Polyphthalamide*) foi atribuído para o *case*, o material Silica Epoxy foi empregado para o gel isolante elétrico e o material AlSiC-75%SiC (*aluminum silicon carbide*) foi selecionado para a base do módulo IGBT, como mostrado nas Figura 7 e Figura 8. Ao chip IGBT e ao chip diodo foram atribuídos o material silício, como ilustrado nas Figura 9 e Figura 10. As propriedades térmicas de cada material utilizado na simulação para uma temperatura ambiente de 25 °C estão apresentadas na Tabela 5, onde a capacidade térmica volumétrica é dado pelo produto entre o calor específico e a massa específica.

Material	Condutividade térmica (W/mK)	Capacidade térmica volumétrica (kJ/m³K)
Silício	148	1650
Cobre	394	3400
Alumínio	230	2480
Solda	70	1670
Epoxyd	3	100
Silica Epoxy	1,6	2379
AlSiC (75% SiC)	180	2223
PPA	20	1639

23

O material adotado para o dissipador aletado foi o alumínio, no qual as propriedades térmicas estão apresentadas na Tabela 5. Os materiais dos demais componentes permaneceram os mesmos do primeiro domínio computacional Semikron.

3.4 Malha de elementos finitos

O método de elementos finitos foi utilizado para obter a solução das equações. Isso requer uma geração de uma malha computacional para resolver o modelo de equações discretas. A seguir, são apresentados gráficos de sensibilidade de discretização espacial e temporal onde é calculado o erro relativo para cada malha. Este erro é calculado pela seguinte fórmula.

$$Erro\ Relativo\ (\%) = 100 \left[\frac{|T_{ref} - T_a|}{T_{ref}} \right] \quad (24)$$

Onde, T_{ref} é a temperatura de referência e T_a é a temperatura avaliada na malha em questão. Em cada estudo de sensibilidade foi adotada para a temperatura de referência o valor de temperatura obtida para a malha mais refinada para discretização espacial e a maior discretização temporal para a sensibilidade temporal.

3.4.1 Malha de elementos finitos – Módulo Siemens

Foram construídas quatro malhas diferentes para o modelo Siemens. A malha 1 consiste de uma malha menos refinada, enquanto que a malha 4 é a mais refinada, ou seja, com maior número de elementos. A Figura 12 mostra o estudo de sensibilidade da malha para temperatura máxima global, mínima global e máxima na base do módulo IGBT.

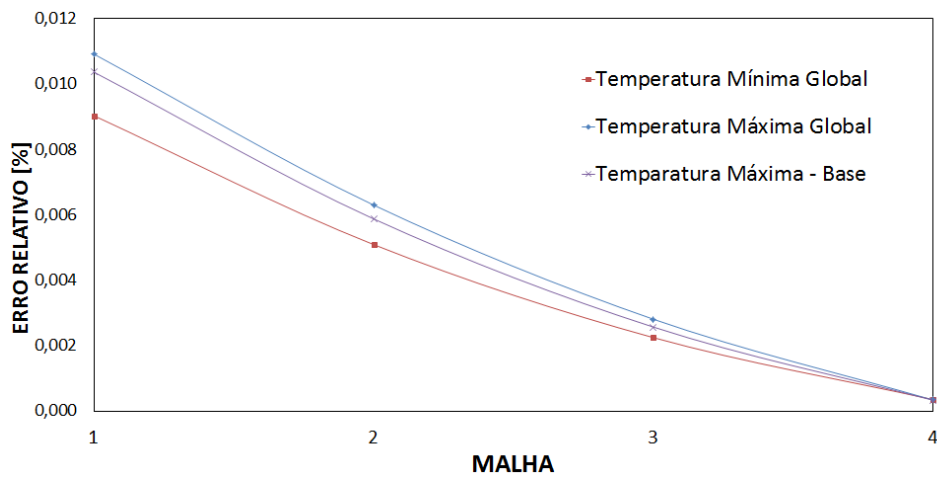


Figura 12 – Gráficos de sensibilidade de malha para o modelo Siemens. Erro relativo referente às temperaturas dos modelos 1 a 4.

A análise de sensibilidade da malha de elementos finitos determinou a malha mais apropriada para as simulações. A análise de sensibilidade de discretização temporal com cinco passos de tempo diferentes, também foi considerada, usando a malha 4, como mostrado na Figura 13 e na Tabela 6.

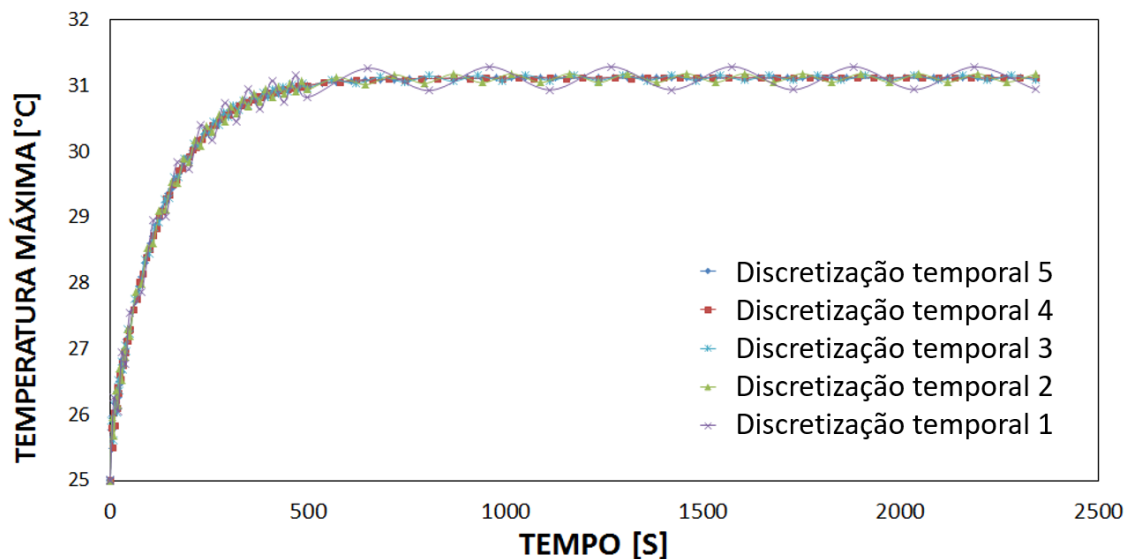


Figura 13 – Gráfico da temperatura máxima global ao longo do tempo para diferentes discretizações temporais para o modelo Siemens.

Tabela 6 – Sensibilidade da discretização temporal para o modelo Siemens.

Discretização temporal	Erro Relativo para temperatura máxima [%]
1	0,003111
2	0,000900
3	0,000514
4	0,000289
5	-

Com base na análise dos gráficos de sensibilidade de malha, optou-se pelo modelo com a malha 4 e a discretização temporal 4, por apresentarem o menor erro relativo. A Figura 14 mostra a malha usada para obter os resultados de simulações que serão apresentados no capítulo de resultados. A malha contém 100380 nós e 14452 elementos de segunda ordem SOLID90. Esta malha apresenta um maior refinamento na região do chip IGBT de silício, onde apresentam os maiores gradientes de temperatura e, portanto, maior geração de calor localizado decorrente principalmente do efeito Joule.

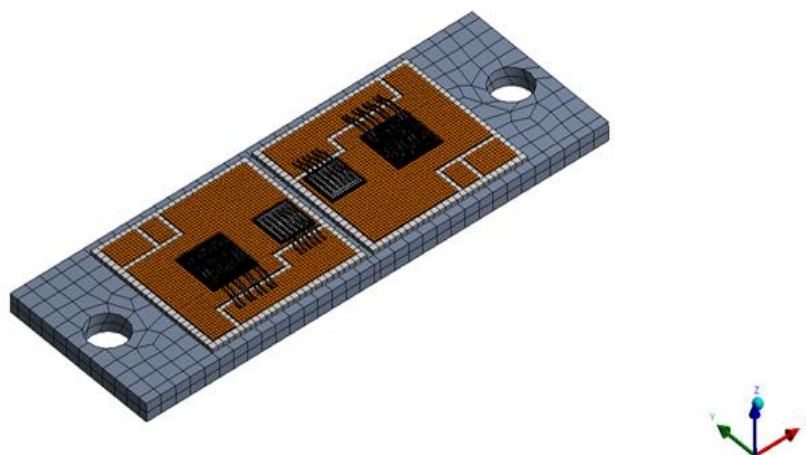


Figura 14 – Malha de elementos finitos usada no modelo da Siemens.

3.4.2 Malha de elementos finitos – Módulo Semikron

Os resultados de temperatura no módulo IGBT Semikron sem o dissipador foram analisados para quatro malhas diferentes, onde a malha 1 consiste em uma malha menos

refinada, enquanto que a malha 4 é a mais refinada, com maior número de elementos. A Figura 15 mostra um estudo de sensibilidade de malha para temperatura máxima global, máxima nas faces superiores do *case* e máxima na base do módulo IGBT.

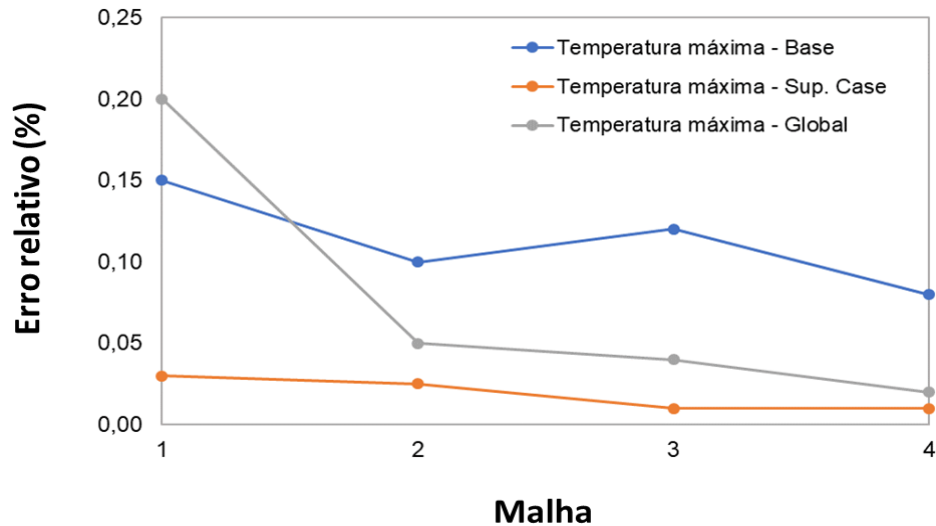


Figura 15 – Gráfico de sensibilidade de malha para o modelo Semikron sem dissipador.

Análise de sensibilidade de discretização temporal também foi realizada. Assim, as temperaturas no módulo foram analisadas para cinco diferentes discretizações temporais, usando a malha 4, como mostrado na Figura 16.

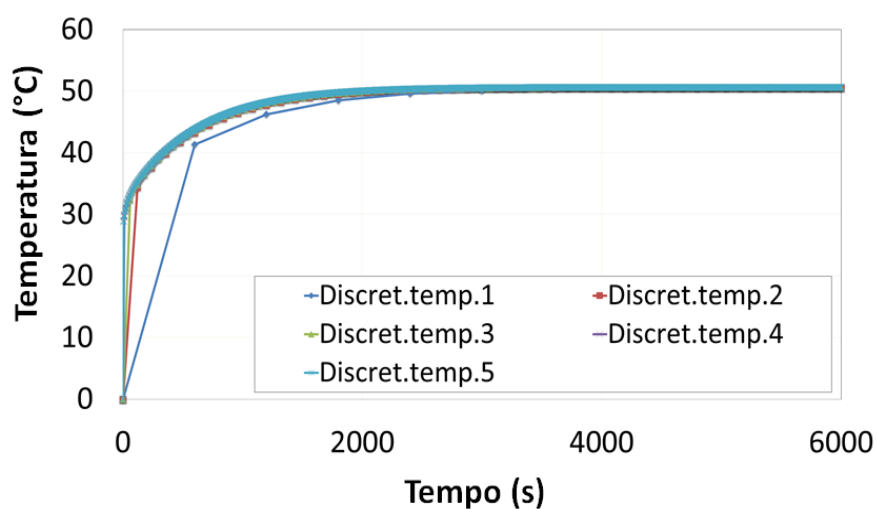


Figura 16 – Gráfico de sensibilidade da discretização temporal para tempo de 6000 segundos para o modelo Semikron sem dissipador.

A partir da análise de sensibilidade da malha de elementos finitos, foram escolhidas para serem utilizadas nas simulações a discretização temporal 5 e a malha 4, com aproximadamente 1 milhão de nós e 330 mil elementos de alta ordem do tipo SOLID90, o qual possui 20 nós e um grau de liberdade em cada nó, a saber: a temperatura. Detalhes desta malha estão ilustrados na Figura 17.

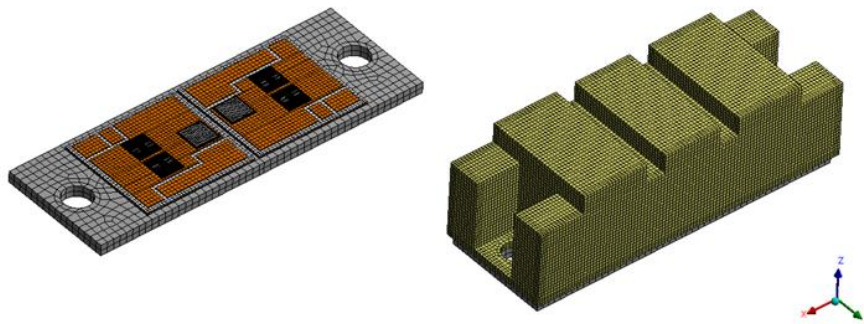


Figura 17 – Malha utilizada no o modelo numérico do módulo da Semikron sem dissipador.

Os resultados de temperatura no módulo IGBT Semikron com o dissipador foram analisados para três malhas diferentes, onde a malha 1 consiste de uma malha mais grosseira, enquanto que a malha 3 é a mais refinada, com maior número de elementos. A Figura 18 mostra um estudo de sensibilidade da malha para a temperatura máxima no chip IGBT, nas aletas do dissipador aletado e no *case*.

Os resultados de temperatura no módulo IGBT foram analisados para quatro malhas diferentes.

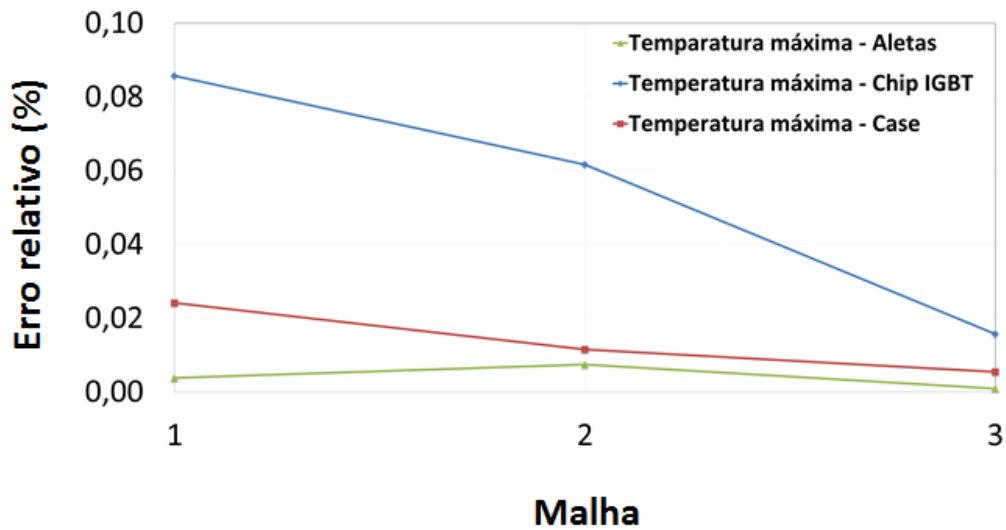


Figura 18 – Gráfico de sensibilidade de malha para o modelo Semikron com dissipador.

Análise de sensibilidade de discretização temporal também foi realizada, como indicado na Figura 19. Assim, as temperaturas no módulo foram analisadas para seis diferentes discretizações temporais, usando a malha 3 para este estudo.

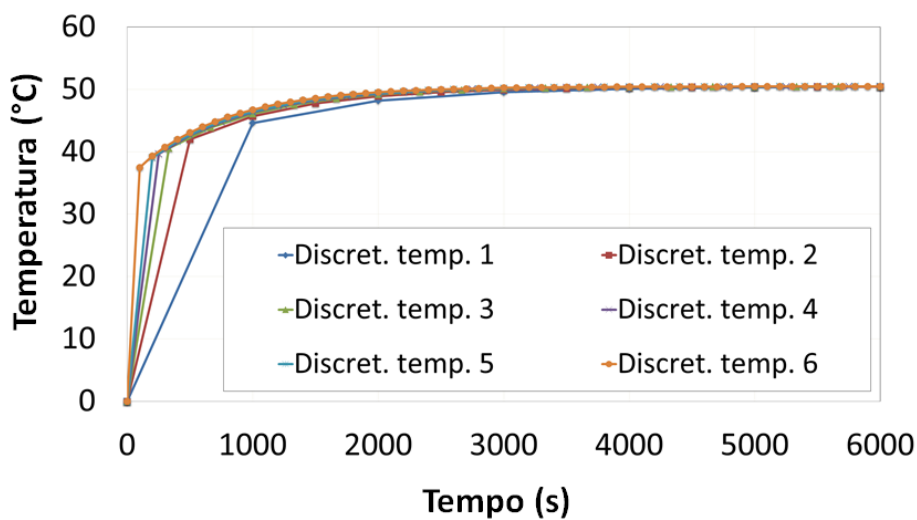


Figura 19 – Gráfico de sensibilidade da discretização temporal para tempo de 6000 segundos para o modelo Semikron com dissipador.

O erro relativo dos valores de temperatura máxima do modelo no instante 6000 segundos, de cada discretização temporal, está indicado na Tabela 7.

Tabela 7 – Sensibilidade da discretização temporal para o modelo Semikron com dissipador.

Discretização temporal	Erro relativo (%)
Discretização temporal 1	0,08
Discretização temporal 2	0,02
Discretização temporal 3	0,01
Discretização temporal 4	0,01
Discretização temporal 5	0,01
Discretização temporal 6	-

A partir da análise de sensibilidade da malha de elementos finitos, foram escolhidas para ser utilizada no Caso 3 a discretização temporal 5 e a malha 3 com aproximadamente 1 milhão e 300 mil nós e 400 mil elementos de alta ordem do tipo SOLID90. Detalhes desta malha estão ilustrados na Figura 25.

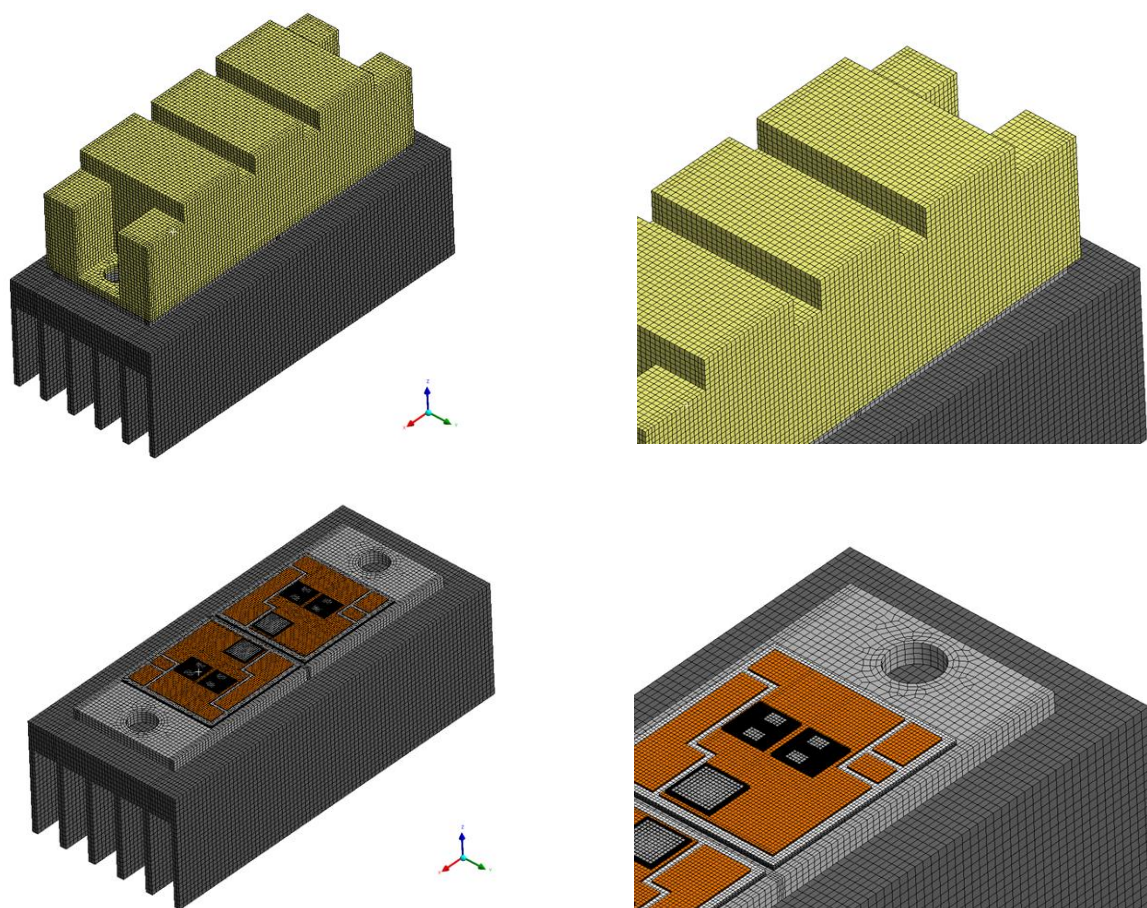


Figura 20 – Malha utilizada no modelo numérico do módulo da Semikron com dissipador.

3.5 Condições de contorno

As condições de contorno apropriadas são adotadas para a solução do sistema de equações. As condições de contorno foram escolhidas para representar os casos apresentados no item 3.2 desta dissertação.

3.5.1 Radiação térmica

3.5.1.1. Módulo Siemens

Conforme destacado na cor azul na Figura 21, um valor de emissividade de 0,97 é usado para a perda de calor por radiação nas faces onde foi aplicada a tinta de grafite. Esta tinta auxilia na captura da distribuição de temperatura pela câmera termográfica usada no experimento do módulo IGBT. Algumas faces da base do módulo IGBT não foram pintadas, de modo que o valor da emissividade nestas faces foi de 0,05 referente a um metal polido, em temperatura ambiente de 25°C [34], como mostrado na Figura 22.

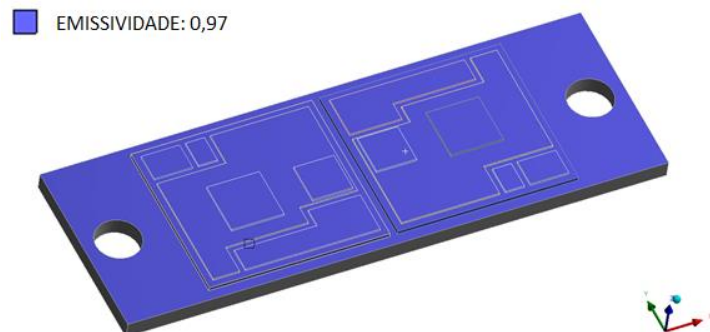


Figura 21 – Faces do módulo Siemens com emissividade de 0,97.

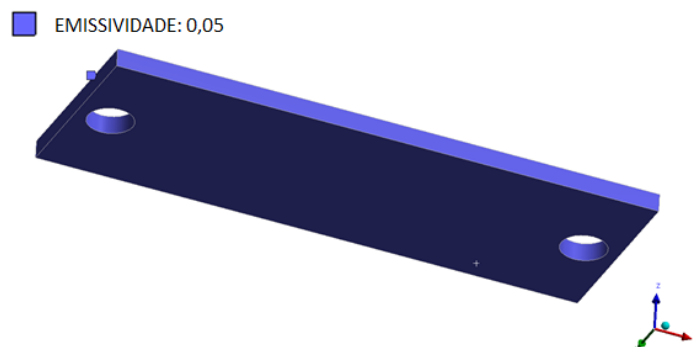


Figura 22 – Faces do módulo Siemens com emissividade de 0,05.

3.5.1.2. Módulo Semikron

No caso do módulo Semikron sem dissipador, a radiação foi modelada utilizando a emissividade de 0,97 sobre a superfície da base do módulo IGBT, uma vez que no experimento essa superfície foi pintada com uma tinta grafite com emissividade conhecida. Para as demais superfícies, que não foram pintadas, foi adotada uma emissividade de 0,84, referente ao valor da emissividade do plástico branco [35], como mostrado na Figura 23.

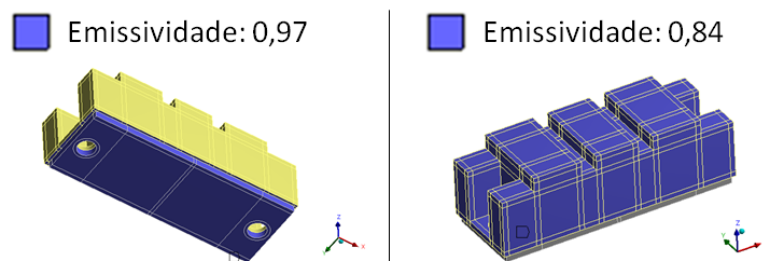


Figura 23 – Superfícies do módulo Semikron sem dissipador com diferentes emissividades.

No caso do módulo Semikron com dissipador, a radiação foi modelada utilizando a emissividade de 0,05 sobre a superfície da base do módulo IGBT e para o dissipador aletado, uma vez que ambos possuem o alumínio como material constituinte. Para as demais superfícies, foi adotada uma emissividade de 0,84, referente ao valor da emissividade do plástico branco [35], como mostrado na Figura 24.

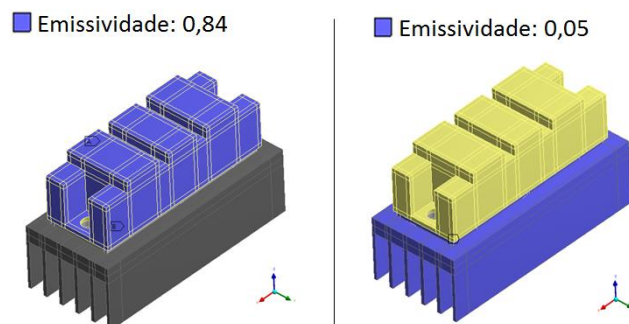


Figura 24 – Superfícies do módulo Semikron com dissipador com diferentes emissividades.

3.5.2 Convecção Natural

3.5.2.1. Módulo Siemens

A Figura 25 mostra as superfícies voltadas para cima referentes ao contorno do módulo Siemens, separadas por diferentes áreas.

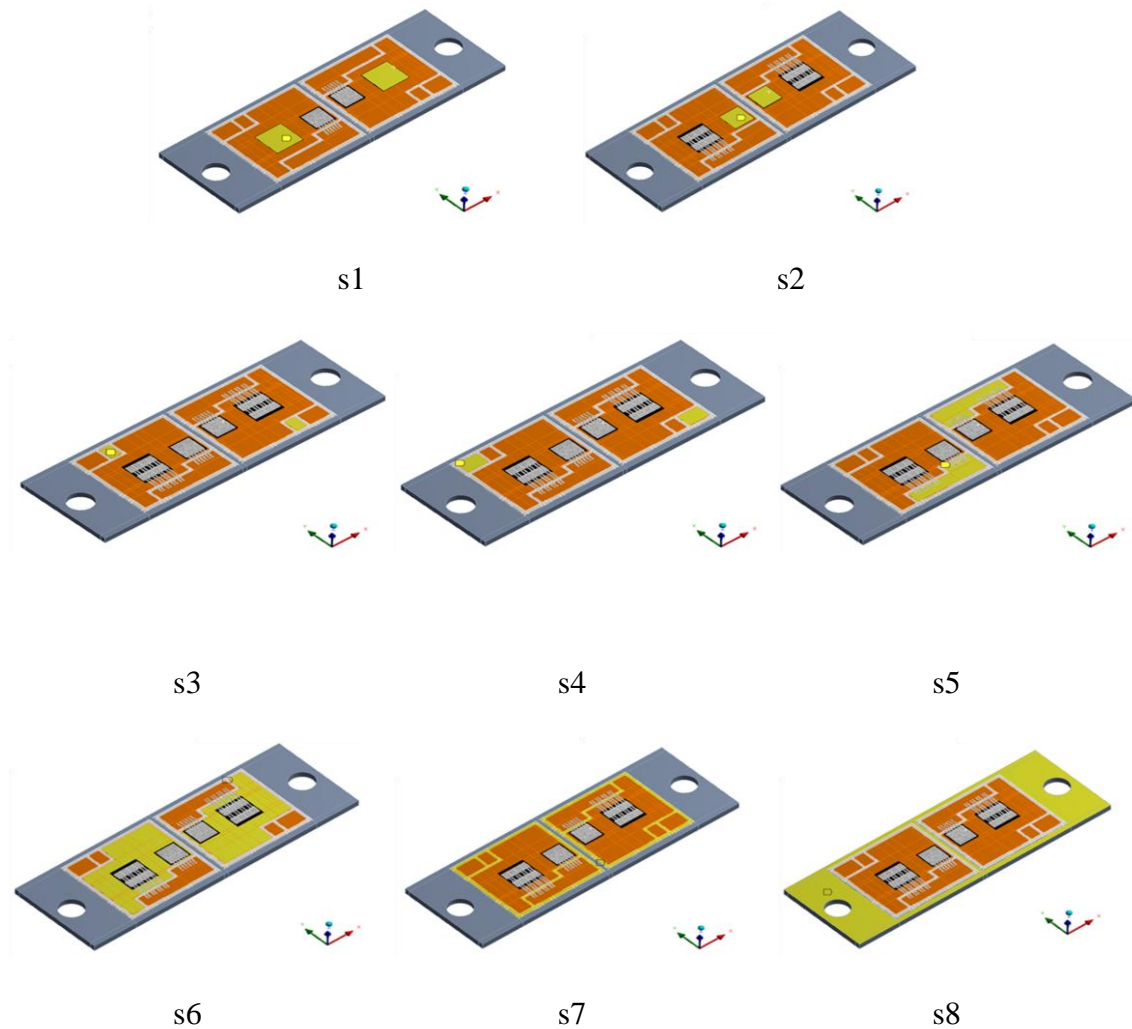


Figura 25 – Superfícies voltadas para cima, destacadas em amarelo, do módulo IGBT Siemens.

A Tabela 8 apresenta informações de área, perímetro e comprimento característico referentes as superfícies destacadas na Figura 25, estes valores são utilizados para calcular o coeficiente de transferência de calor de cada superfície.

Tabela 8 – Detalhamento das superfícies voltadas para cima do módulo Siemens e seus respectivos coeficientes de transferência de calor.

Superfície (Componente)	Coeficiente de transferência de calor	Área [mm ²]	Perímetro [mm]	Comprimento característico [mm]
s1 (IGBT)	$h1$	79,21	35,60	2,23
s2 (Diodo)	$h2$	46,24	27,20	1,70
s3 (Cobre)	$h3$	15,04	15,80	0,95
s4 (Cobre)	$h4$	30,55	22,40	1,36
s5 (Cobre)	$h5$	119,36	60,00	1,99
s6 (Cobre)	$h6$	384,81	170,80	2,25
s7 (Al ₂ O ₃)	$h7$	181,59	323,40	0,56
s8 (Base)	$h8$	1069,80	527,95	2,03

A Figura 26 apresenta os coeficientes de transferência de calor variando com a temperatura, obtidos a partir das correlações para placa voltada para cima [21] e uma temperatura ambiente de 25°C para o módulo IGBT Siemens aberto.

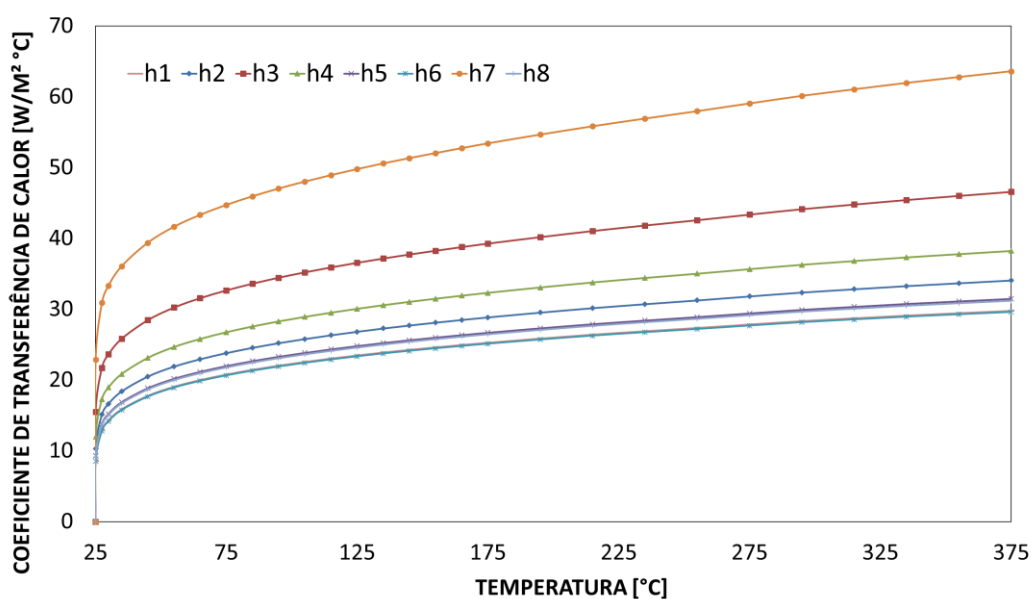


Figura 26 – Variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura das superfícies voltadas para cima do módulo Siemens.

A Figura 27 mostra as superfícies verticais referentes ao contorno do módulo Siemens, separadas por diferentes alturas.

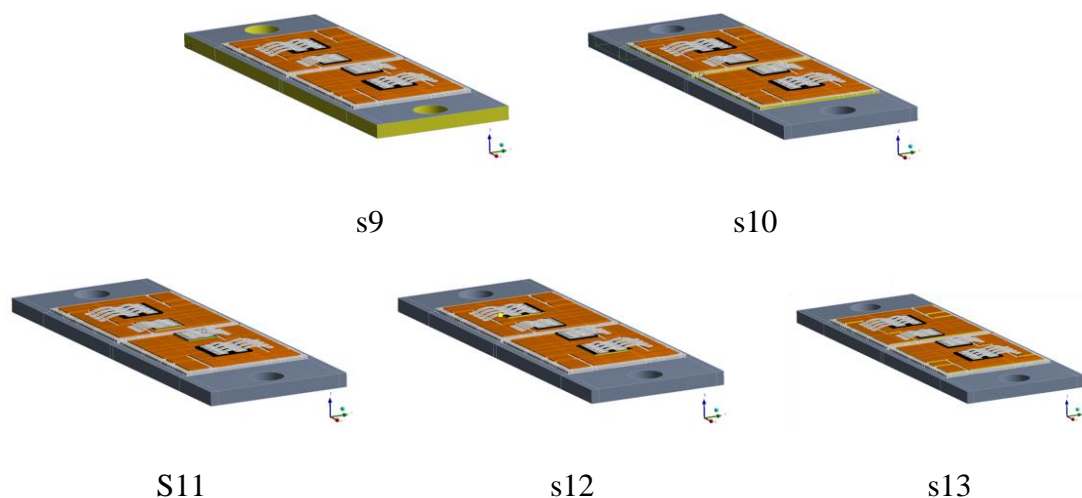


Figura 27 – Superfícies voltadas para cima, destacadas em amarelo, do módulo IGBT Siemens.

A Tabela 9 apresenta informações do comprimento característico referentes às superfícies destacadas na Figura 27, estes valores são utilizados para calcular o coeficiente de transferência de calor de cada superfície.

Tabela 9 – Detalhamento das superfícies verticais do módulo Siemens e seus respectivos coeficientes de transferência de calor.

Superfície (Componente)	Coeficiente de transferência de calor	Comprimento característico [mm]
s9 (Base)	h_9	3,00
s10 (Al ₂ O ₃)	h_{10}	0,67
s11 (Diodo)	h_{11}	0,31
s12 (IGBT)	h_{12}	0,31
s13 (Cobre)	h_{13}	0,29

A Figura 28 apresenta os coeficientes de transferência de calor variando com a temperatura, obtidos a partir das correlações para superfícies verticais [22] e uma temperatura ambiente de 25°C para o módulo IGBT Siemens aberto.

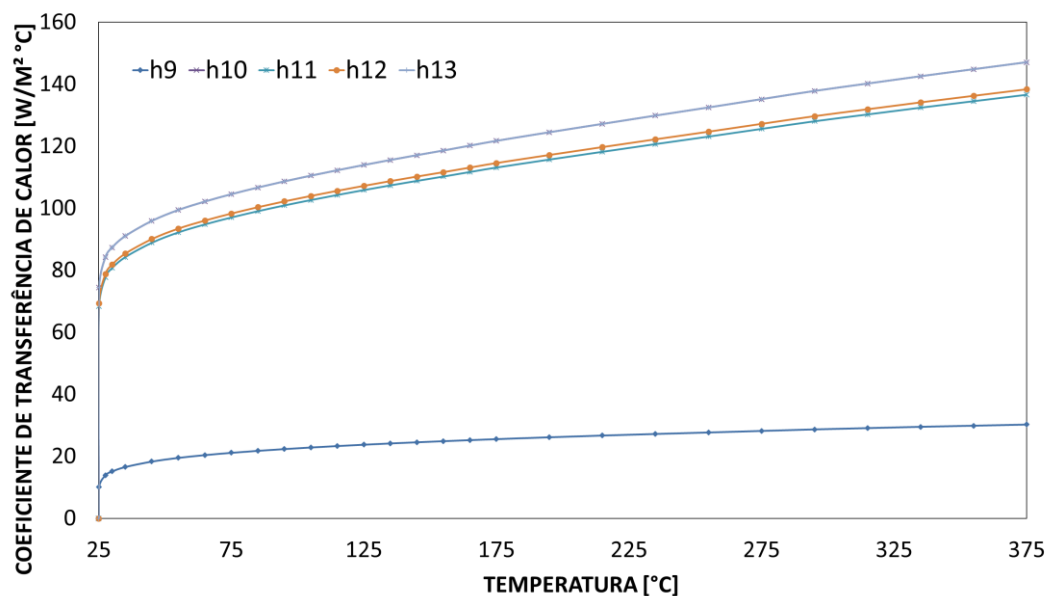
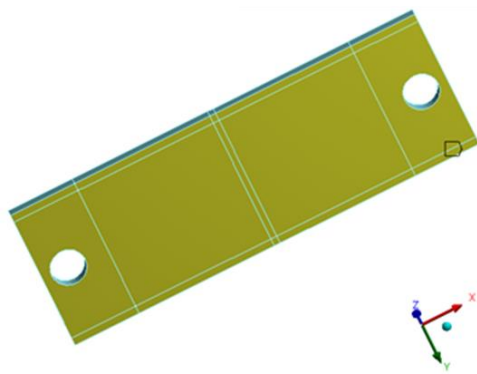


Figura 28 – Variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura das superfícies verticais do módulo Siemens.

A Figura 29 mostra a superfície voltada para baixo referentes ao contorno do módulo Siemens.



s14

Figura 29 – Superfície voltada para baixo, destacadas em amarelo, do módulo IGBT Siemens.

A Tabela 10 apresenta informações de área, perímetro e comprimento característico referente a superfície destacada na Figura 29, estes valores são utilizados para calcular o coeficiente de transferência de calor de cada superfície.

Tabela 10 – Detalhamento da superfície voltada para baixo do módulo Siemens e seu respectivo coeficiente de transferência de calor.

Superfície (Componente)	Coeficiente de transferência de calor	Área [mm²]	Perímetro [mm]	Comprimento característico [mm]
s14 (Base)	<i>h14</i>	2783,40	293,55	9,48

A Figura 30 apresenta os coeficientes de transferência de calor variando com a temperatura, obtidos a partir das correlações para placa voltada para baixo [23] e uma temperatura ambiente de 25°C para o módulo IGBT Siemens aberto.

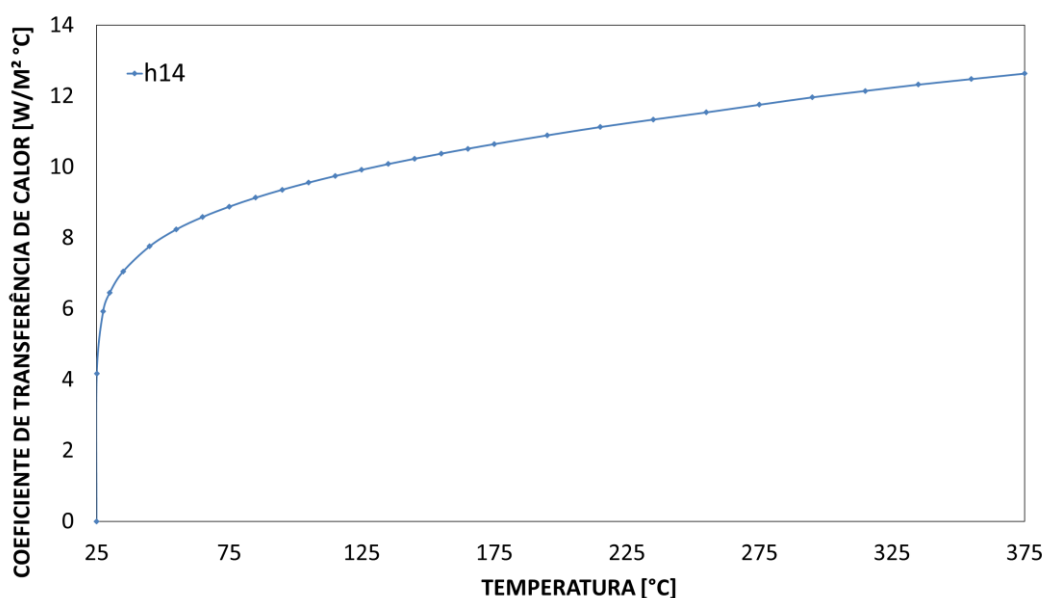


Figura 30 – Variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura da superfície voltada para baixo do módulo Siemens.

3.5.2.2. Módulo Semikron

As superfícies voltadas para cima referentes ao contorno do módulo Semikron sem dissipador foram separadas em cinco regiões com diferentes áreas, como indicado na Figura 31.

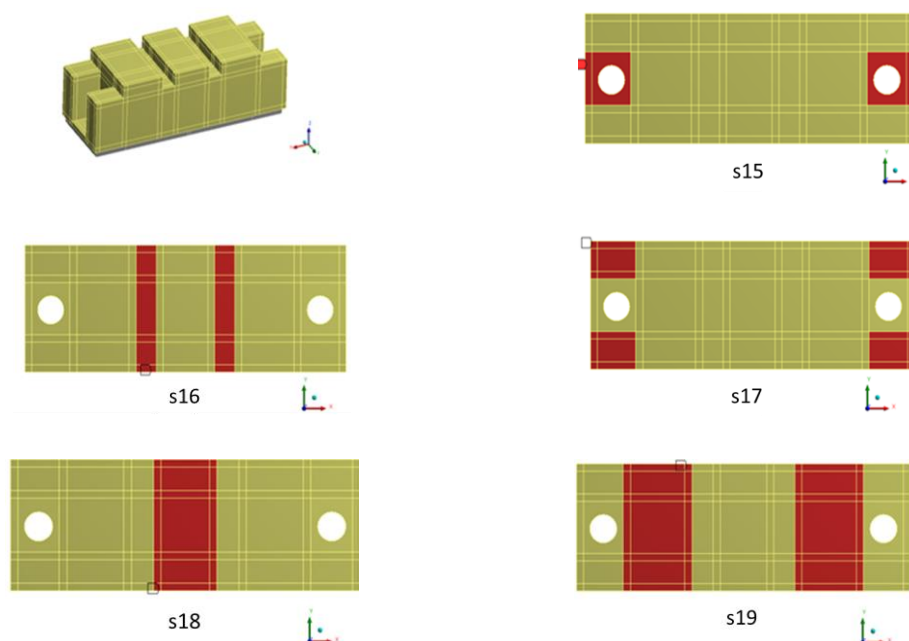


Figura 31 – Superfícies voltadas para cima, destacadas em vermelho, do módulo Semikron sem dissipador.

A Tabela 11 apresenta mais detalhes a respeito dessas regiões.

Tabela 11 – Detalhamento das superfícies voltadas para cima do módulo Semikron sem dissipador e seus respectivos coeficientes de transferência de calor.

Superfície (Componente)	Coeficiente de transferência de calor	Área [mm²]	Perímetro [mm]	Comprimento característico [mm]
s15 (PPA)	h_{15}	138,74	78,18	1,78
s16 (PPA)	h_{16}	204,00	80,00	2,55
s17 (PPA)	h_{17}	131,50	46,30	2,84
s18 (PPA)	h_{18}	578,00	102,00	5,67
s19 (PPA)	h_{19}	657,90	106,70	1,99

A Figura 32 apresenta a variação dos coeficientes de transferência de calor com a temperatura da superfície voltada para cima, de acordo com as correlações apresentadas por [21].

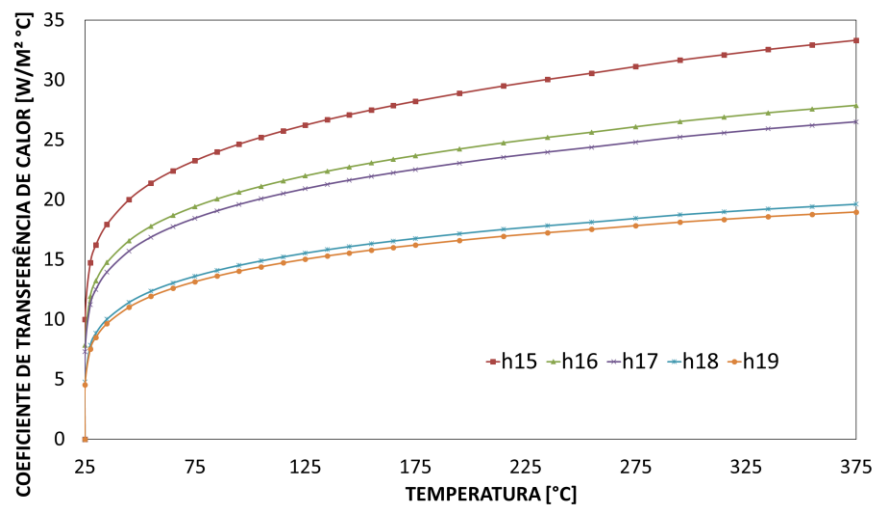


Figura 32 – Variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura das superfícies voltadas para cima do módulo Semikron sem dissipador.

As superfícies verticais referentes ao contorno do módulo Semikron foram separadas em sete regiões com diferentes alturas, como indicado Figura 33.

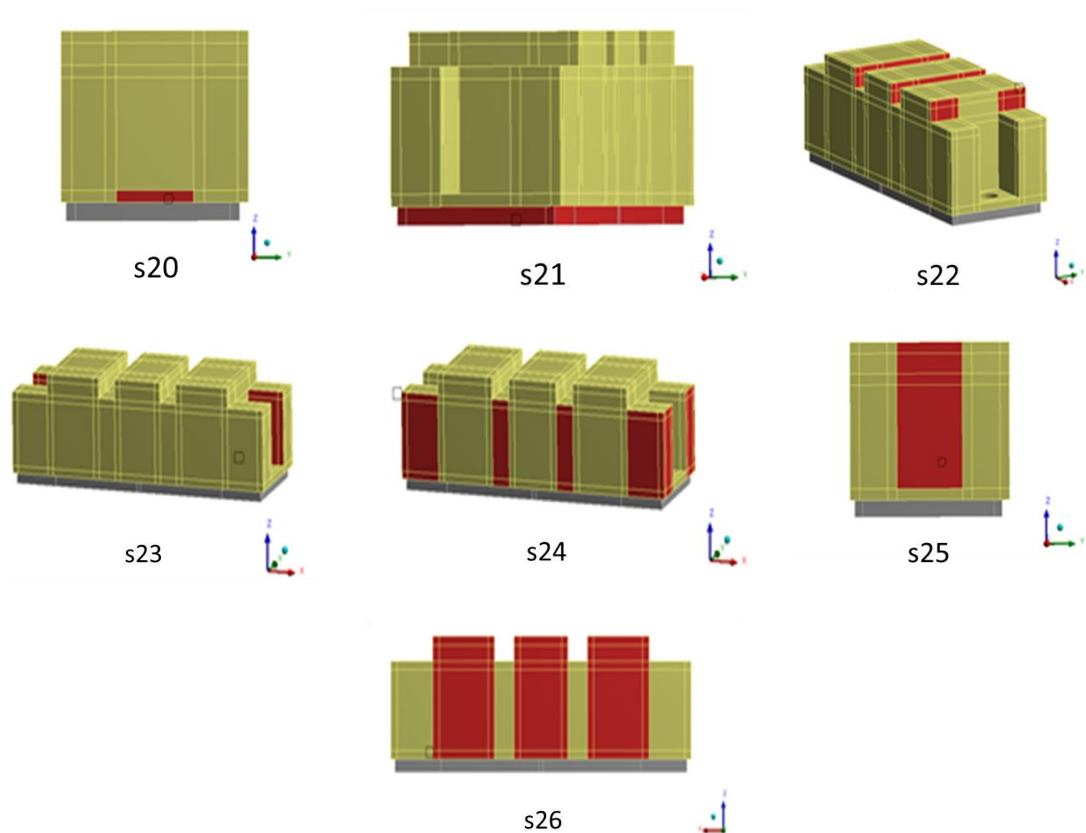


Figura 33 – Superfícies verticais, destacadas em vermelho, do módulo Semikron sem dissipador.

A Tabela 12 apresenta mais detalhes a respeito dessas regiões.

Tabela 12 – Detalhamento das superfícies verticais do módulo Semikron sem dissipador e seus respectivos coeficientes de transferência de calor.

Superfície (Componente)	Coefficiente de transferência de calor	Comprimento característico [mm]
s20 (PPA)	h_{20}	2,00
s21 (AlSiC)	h_{21}	3,00
s22 (PPA)	h_{22}	5,60
s23 (PPA)	h_{23}	20,40
s24 (PPA)	h_{24}	22,40
s25 (PPA)	h_{25}	26,00
s26 (PPA)	h_{26}	28,00

A Figura 34 apresenta a variação dos coeficientes de transferência de calor com a temperatura da superfície vertical, de acordo com as correlações apresentadas por [22].

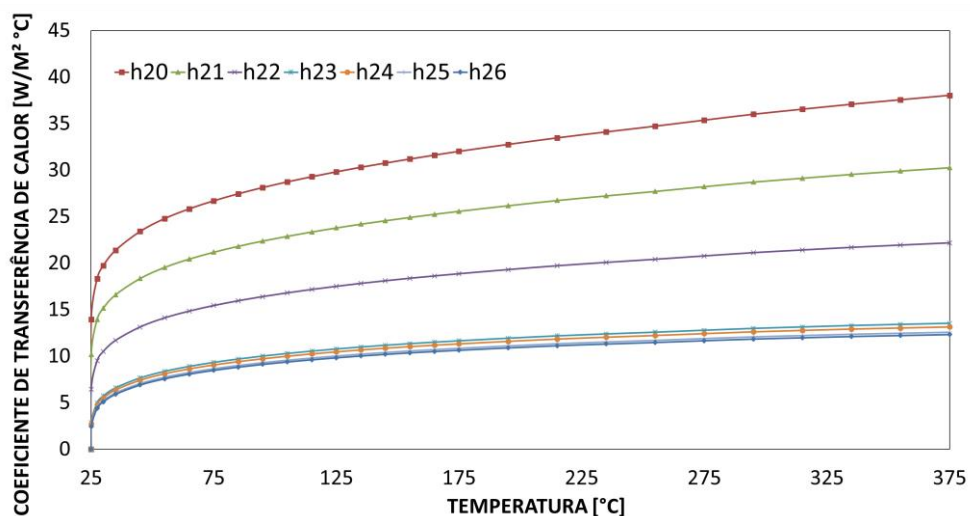


Figura 34 – Variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura das superfícies verticais do módulo Semikron sem dissipador.

As superfícies voltadas para baixo referentes ao contorno do módulo Semikron foram separadas em duas regiões com diferentes áreas, como indicado na Figura 35.

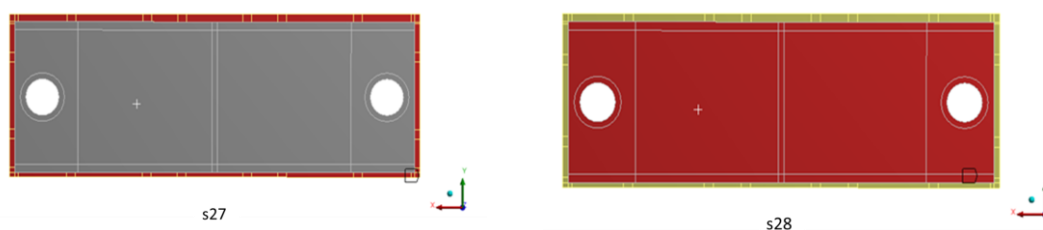


Figura 35 – Superfícies voltadas para baixo, destacadas em vermelho, do módulo Semikron sem dissipador.

A Tabela 13 apresenta mais detalhes a respeito dessas regiões.

Tabela 13 – Detalhamento das superfícies voltadas para baixo do módulo Semikron sem dissipador e seus respectivos coeficientes de transferência de calor.

Superfície (Componente)	Coeficiente de transferência de calor	Área [mm ²]	Perímetro [mm]	Comprimento característico [mm]
s27 (PPA)	h_{27}	322,90	543,00	0,60
s28 (AlSiC)	h_{28}	2782,37	1037,80	2,68

A Figura 36 apresenta a variação dos coeficientes de transferência de calor com a temperatura da superfície voltada para baixo, de acordo com as correlações apresentadas por [23].

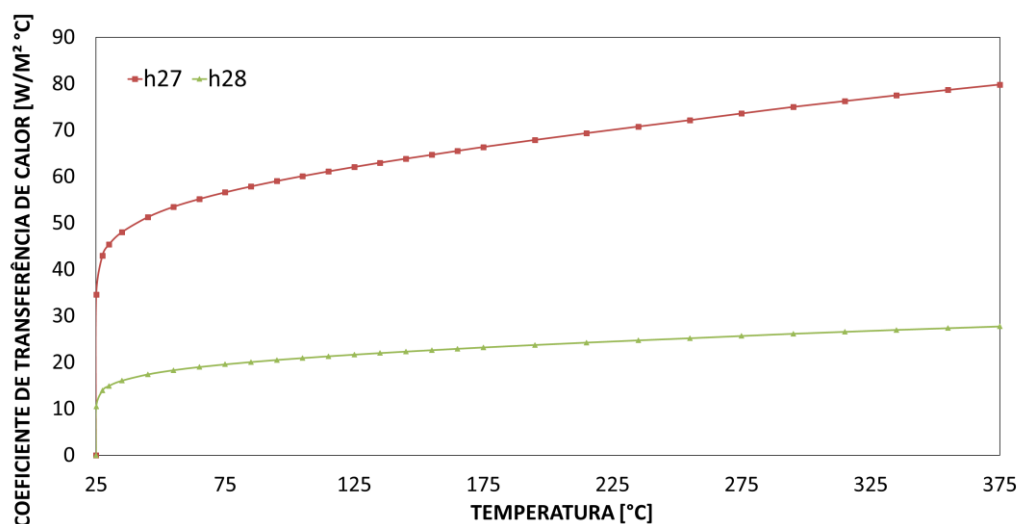


Figura 36 – Variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura das superfícies voltadas para baixo do módulo Semikron sem dissipador.

A seguir, são mostrados os contornos e seus respectivos coeficientes de transferência de calor do módulo Semikron com dissipador.

As superfícies voltadas para cima referentes ao contorno do módulo Semikron com dissipador foram separadas em cinco regiões com diferentes áreas, como indicado na Figura 37.

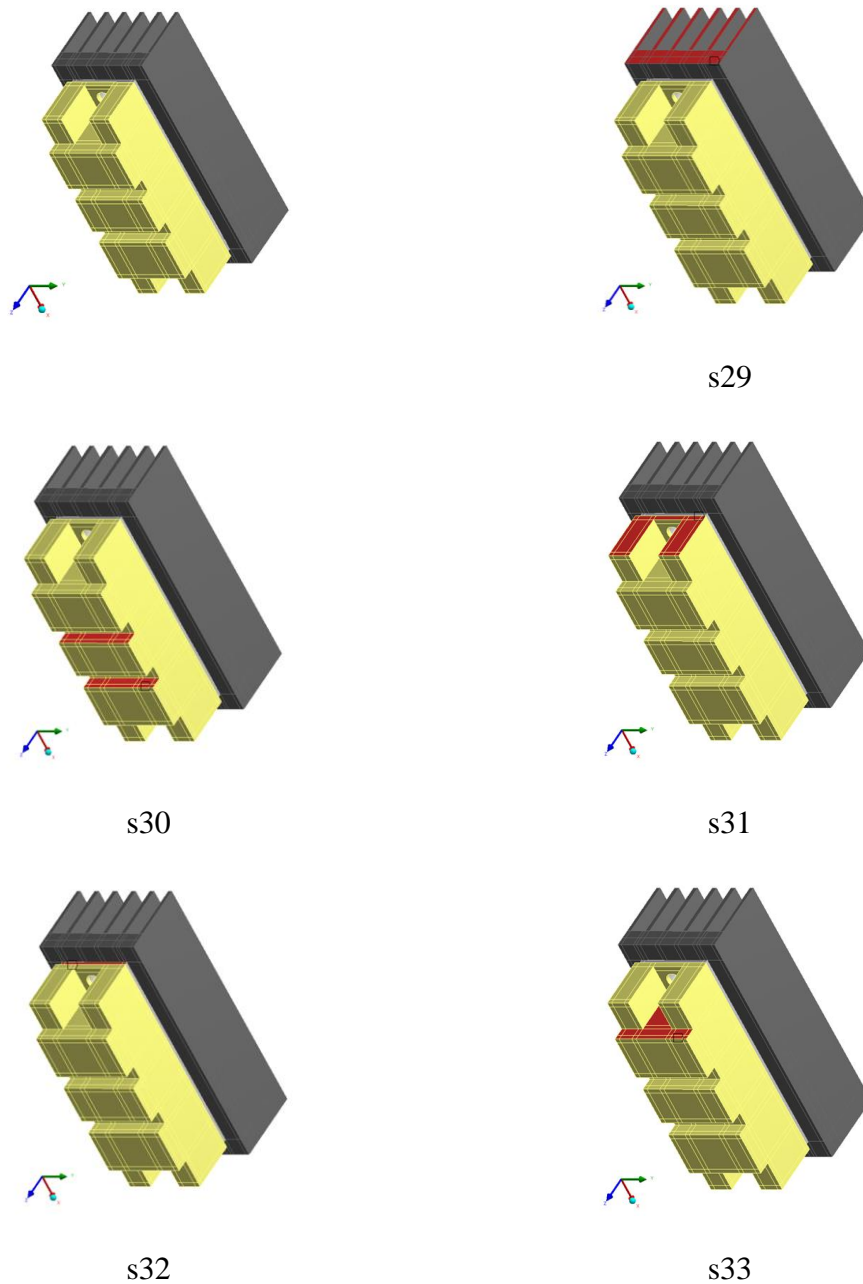


Figura 37 – Superfícies voltadas para cima, destacadas em vermelho, do módulo Semikron com dissipador.

A Tabela 14 apresenta mais detalhes a respeito dessas regiões.

Tabela 14 – Detalhamento das superfícies voltadas para cima do módulo Semikron com dissipador e seus respectivos coeficientes de transferência de calor.

Superfície (Componente)	Coefficiente de transferência de calor	Área [mm ²]	Perímetro [mm]	Comprimento característico [mm]
s29 (Alumínio)	h_{29}	613,12	693,70	0,88
s30 (PPA)	h_{30}	190,40	214,40	0,87
s31 (PPA)	h_{31}	476,00	420,80	1,13
s32 (AlSiC)	h_{32}	94,20	80,80	1,17
s33 (PPA)	h_{33}	476,00	311,20	1,53

A Figura 38 apresenta a variação dos coeficientes de transferência de calor com a temperatura da superfície voltada para cima, de acordo com as correlações apresentadas por [21].

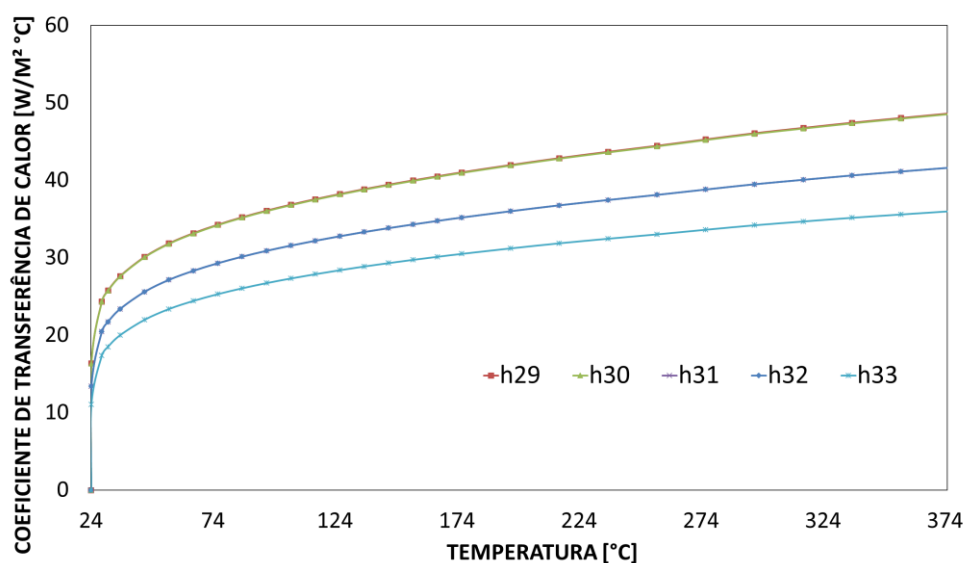


Figura 38 – Variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura das superfícies voltadas para cima do módulo Semikron com dissipador.

As superfícies verticais referentes ao contorno do módulo Semikron com dissipador foram separadas em nove regiões com diferentes alturas, como indicado Figura 39.

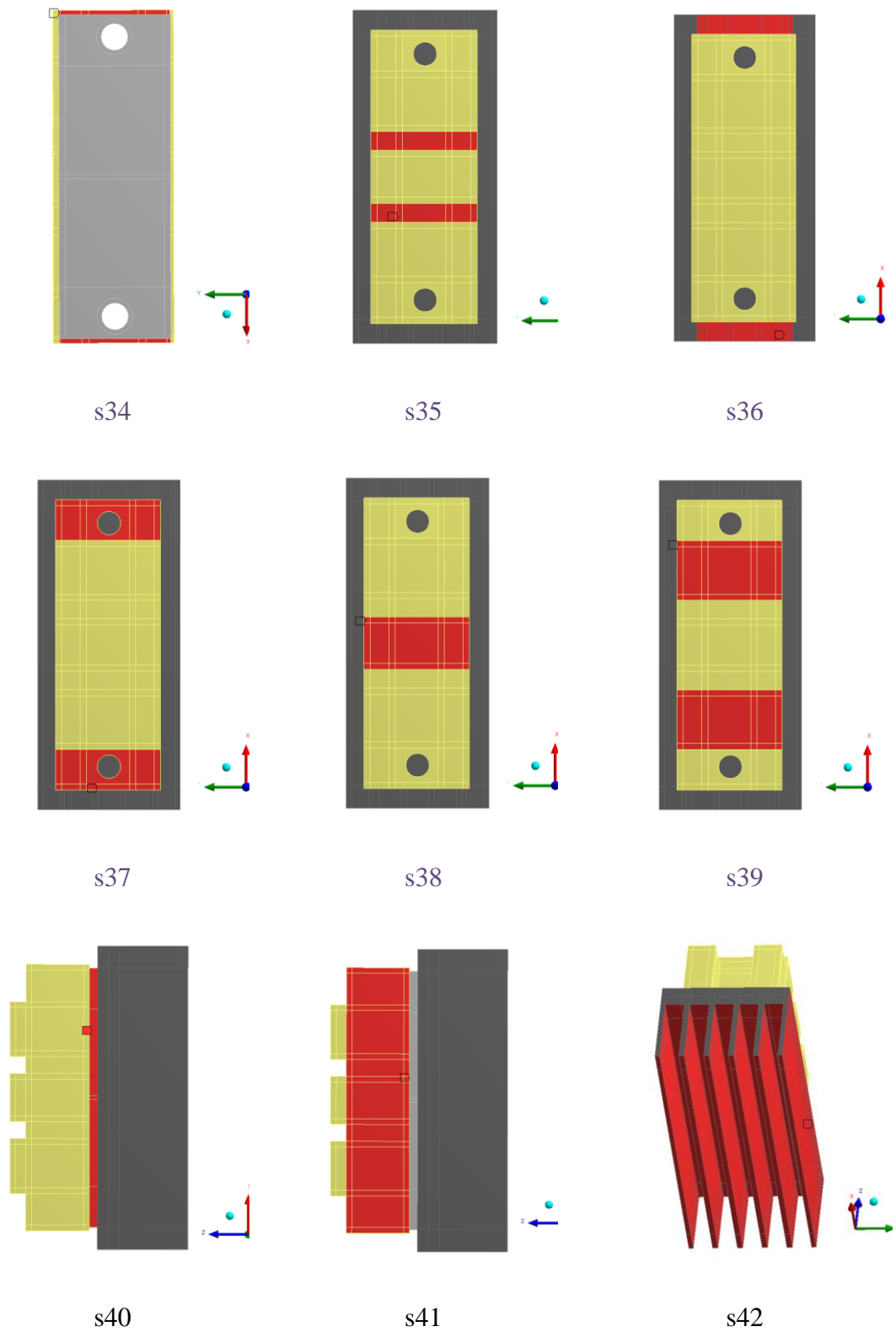


Figura 39 – Superfícies verticais, destacadas em vermelho, do módulo Semikron com dissipador.

A Tabela 15 apresenta mais detalhes a respeito dessas regiões.

Tabela 15 – Detalhamento das superfícies verticais do módulo Semikron com dissipador e seus respectivos coeficientes de transferência de calor.

Superfície (Componente)	Coefficiente de transferência de calor	Comprimento característico [mm]
s34 (PPA)	h_{34}	1,25
s35 (PPA)	h_{35}	6,00
s36 (PPA)	h_{36}	7,70
s37 (PPA)	h_{37}	13,50
s38 (PPA)	h_{38}	17,00
s39 (PPA)	h_{39}	19,35
s40 (AlSiC)	h_{40}	91,50
s41 (PPA)	h_{41}	94,00
s42 (Alumínio)	h_{42}	106,90

A Figura 40 apresenta a variação dos coeficientes de transferência de calor com a temperatura da superfície vertical, de acordo com as correlações apresentadas por [22].

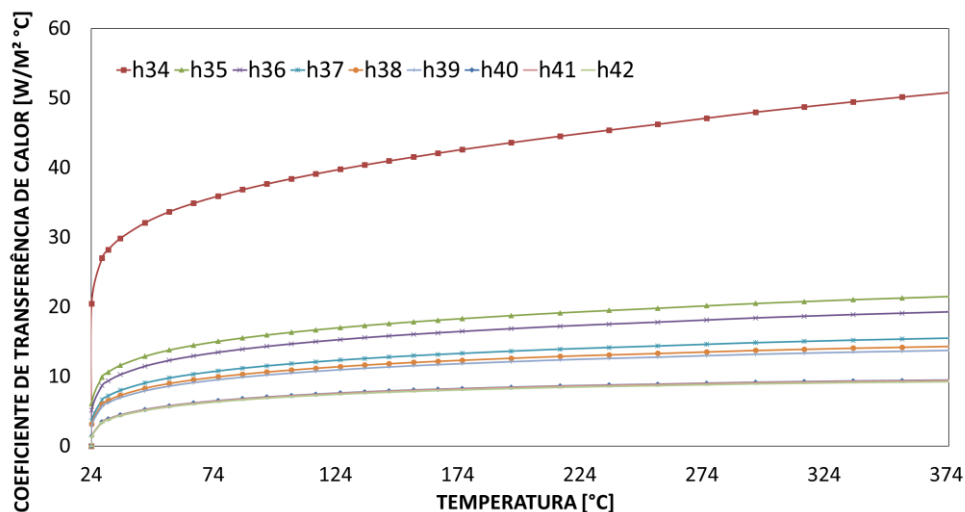
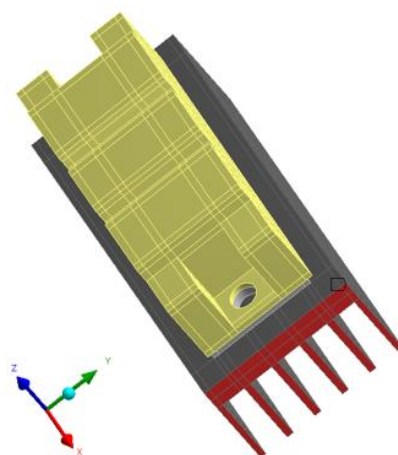
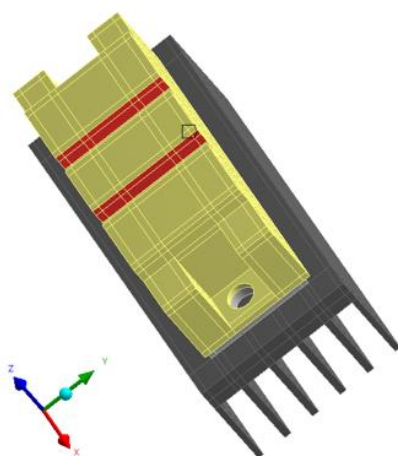


Figura 40 – Variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura das superfícies verticais do módulo Semikron com dissipador.

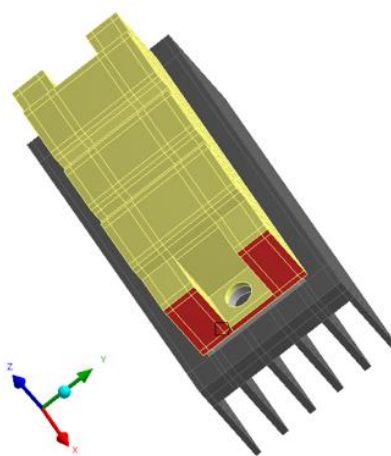
As superfícies voltadas para baixo referentes ao contorno do módulo Semikron com dissipador foram separadas em cinco regiões com diferentes áreas, como indicado na Figura 41.



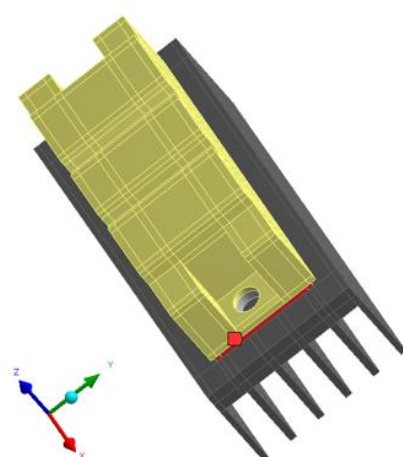
s43



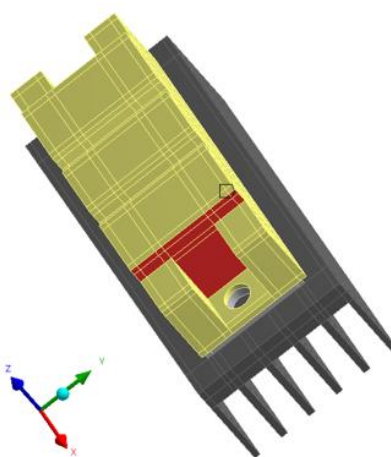
s44



s45



s46



s47

Figura 41 – Superfícies voltadas para baixo, destacadas em vermelho, do módulo Semikron com dissipador.

A Tabela 16 apresenta mais detalhes a respeito dessas regiões.

Tabela 16 – Detalhamento das superfícies voltadas para baixo do módulo Semikron e seus respectivos coeficientes de transferência de calor.

Superfície (Componente)	Coefficiente de transferência de calor	Área [mm ²]	Perímetro [mm]	Comprimento característico [mm]
s43 (Alumínio)	<i>h</i> 43	613,1	693,7	0,88
s44 (PPA)	<i>h</i> 44	190,4	214,4	0,89
s45 (PPA)	<i>h</i> 45	476,0	420,8	1,13
s46 (AlSiC)	<i>h</i> 46	94,20	80,80	1,17
s47 (PPA)	<i>h</i> 47	476,0	311,2	1,53

A Figura 42 apresenta a variação dos coeficientes de transferência de calor com a temperatura da superfície voltada para baixo, de acordo com as correlações apresentadas por [23].

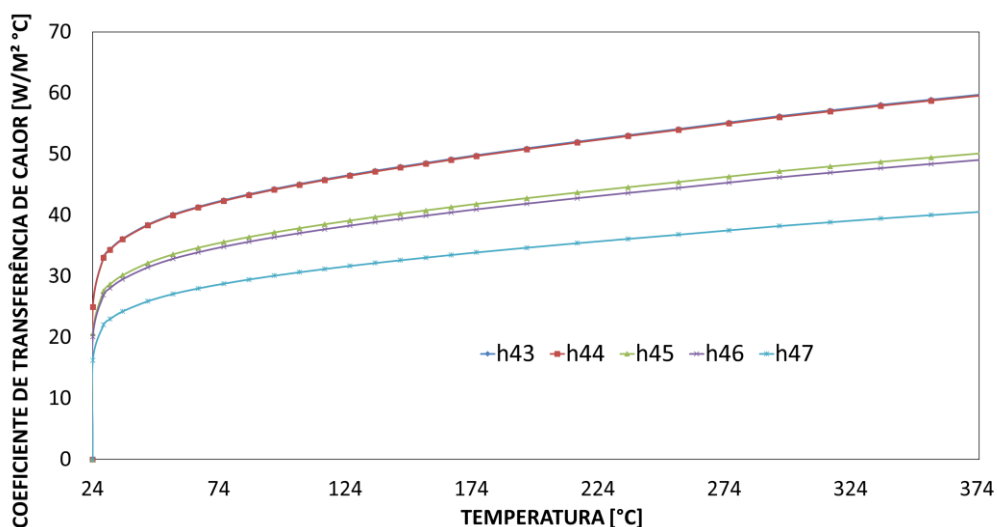


Figura 42 – Variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura das superfícies voltadas para baixo do módulo Semikron com dissipador.

Observa-se que os coeficientes de transferência de calor obtidos apresentam uma maior variação de seu valor quando a temperatura da superfície está mais próxima da temperatura ambiente e conforme se afasta a relação entre o coeficiente de transferência de calor e a temperatura da superfície se comporta de forma aproximadamente linear.

3.6 Fonte térmica

3.6.1 Módulo Siemens

A fonte térmica foi determinada com o objetivo de representar o experimento de condução realizado para o módulo IGBT da Siemens, detalhado no Anexo deste trabalho. Para isso, foi adotada uma potência dissipada de 6,14 W aplicada na região do chip IGBT, destacada em azul na Figura 43 com um volume igual a 24,48 mm³.

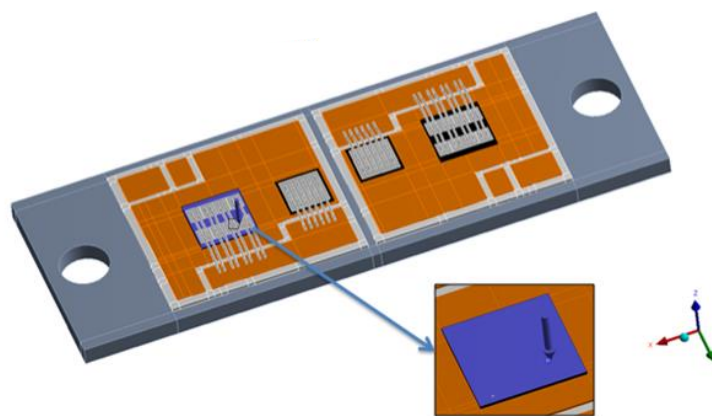


Figura 43 – Região onde a potência é dissipada no módulo SIEMENS.

3.6.1.1. Módulo Semikron

O valor da fonte térmica atribuído ao modelo numérico foi adotado baseado na configuração experimental Semikron descrita no item 3.2 desta dissertação, caracterizado por uma frequência de chaveamento de 500 Hz.

Foi realizada uma simulação com um período de 5 milissegundos, Caso 1, onde a potência real apresentada no experimento Semikron foi utilizada, ou seja, sem utilização do cálculo da média da potência.

Para as Simulações 2 e 3, de 6000 segundos, a potência dissipada, utilizada como termo fonte, foi obtida pelo cálculo do *average smoothing* da potência dissipada durante

o período do chaveamento. No entanto, o Caso 2 utilizou resultados experimentais (Experimento 1.3 apresentado no Anexo) enquanto o Caso 3 usou os resultados da simulação elétrica. A metodologia do cálculo da potência média dissipada está detalhada em [24].

A Tabela 17 indica o valor da potência média dissipada por um dos chips IGBTs com volume de 12,66 mm³ para a configuração Semikron, como indicado na Figura 44. O valor da temperatura inicial dos componentes do módulo IGBT foi adotado como o mesmo da temperatura ambiente, aproximadamente 25°C.

Tabela 17 – Potência dissipada adotada para os casos de chaveamento simulados.

Caso	Modelo	Potência dissipada	Tempo
1	Semikron sem dissipador	Dependente do tempo	0,005 s
2	Semikron sem dissipador	5,0 W (média da potência)	6000 s
3	Semikron com dissipador	6,3 W (média da potência)	6000 s

A Figura 44 destaca a superfície onde a potência dissipada é aplicada no domínio dos Casos 1, 2 e 3 de chaveamento.

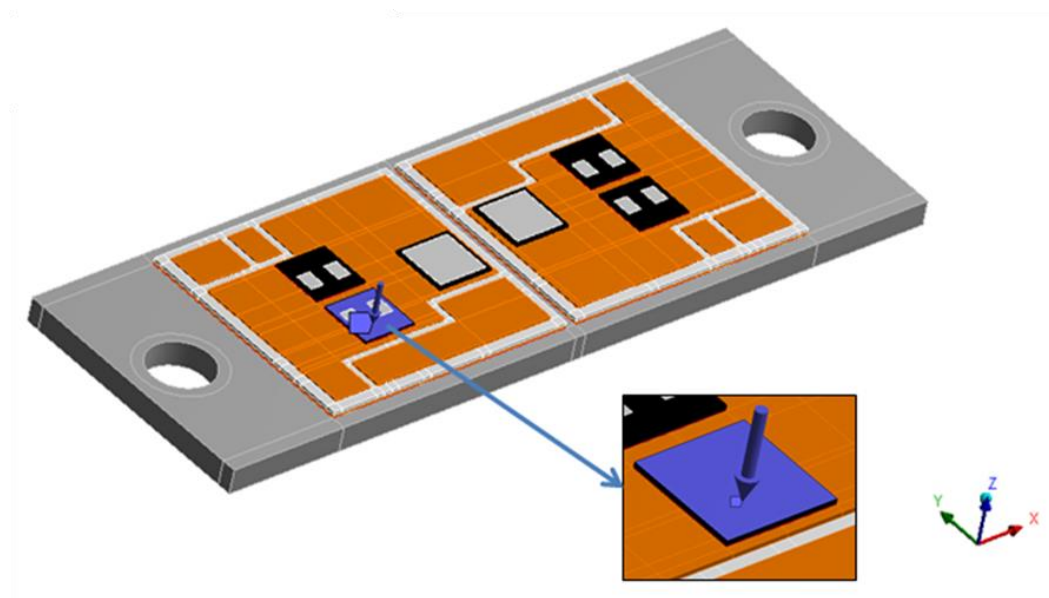


Figura 44 – Região da aplicação da potência dissipada nas simulações 1, 2 e 3.

A variação da potência com o tempo, referente ao Caso 1 de chaveamento descrita na Tabela 17, está ilustrada na Figura 45 e Figura 46. A Figura 45 mostra a potência dissipada durante 2,5 períodos de chaveamento e nela está destacado um pico de potência decorrente do desligamento da chave, sendo essa região denominada Poff, estão indicadas as regiões de não condução e condução do primeiro ciclo e a potência dissipada decorrente a ligamento da chave do segundo ciclo, região denominada Pon. Vale destacar que o comportamento da potência dissipada é igual para todos os ciclos.

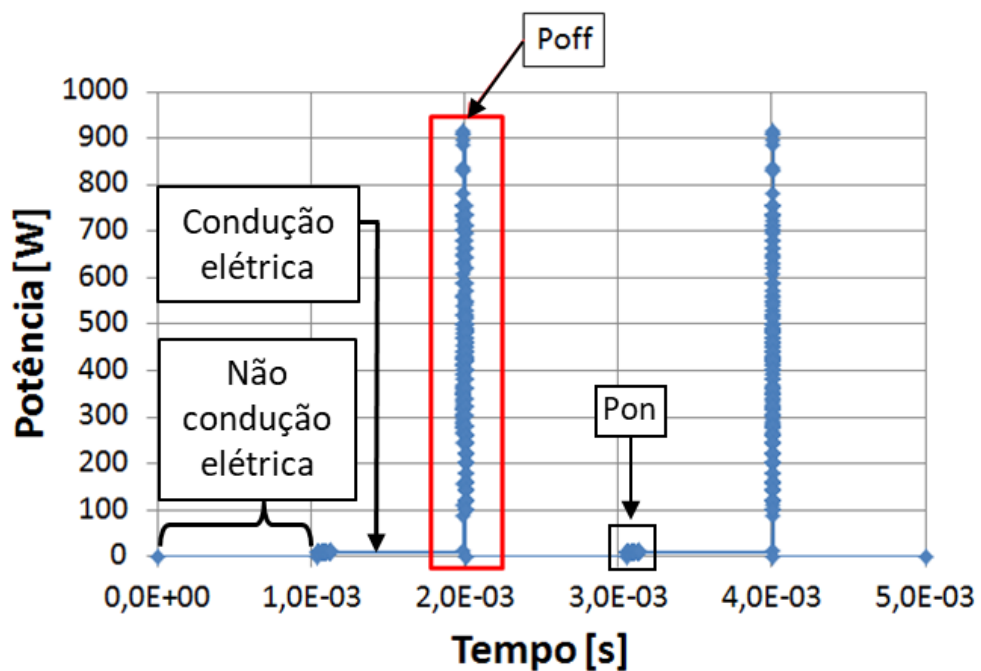


Figura 45 – Potência dissipada real ao longo do tempo de 5 milissegundos.

A potência dissipada total de um ciclo é dada pela equação a seguir.

$$P_t(t) = P_{\text{condução elétrica}} + P_{\text{não-condução elétrica}} + P_{\text{on}} + P_{\text{off}} \quad (25)$$

A Figura 46 mostra com maior detalhamento a variação da potência dissipada durante o período de desligamento da chave, região P_{off} destacada na Figura 45, onde é atingido os valores mais elevados de potência dissipada.

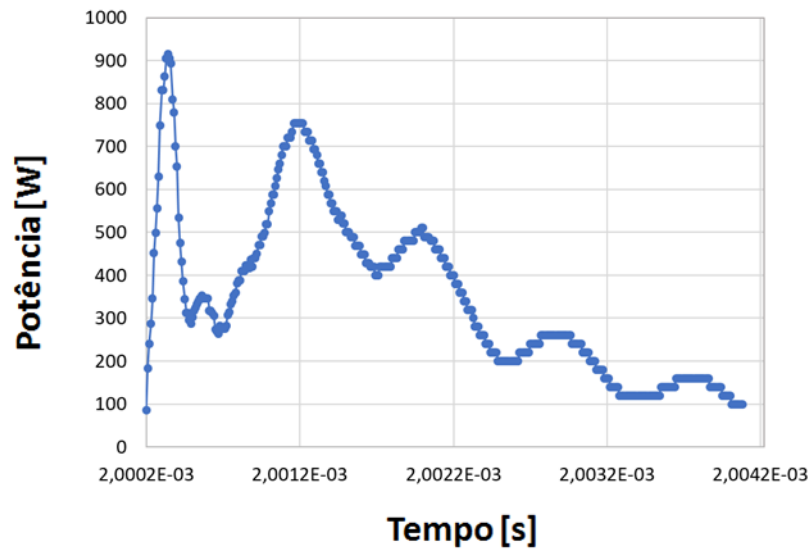


Figura 46 – Potência dissipada real durante o período de desligamento da chave.

4 RESULTADOS

Simulações numéricas do modelo térmico descrito anteriormente são realizadas após a definição de todos os coeficientes de transferência de calor convectivo para todas as superfícies de contorno externo dos módulos IGBTs, da definição das propriedades de radiação, condição inicial, propriedades térmicas dos materiais constituintes e convergência de malha. A partir dos resultados numéricos, uma comparação com os resultados experimentais é realizada.

4.1 Módulo IGBT Siemens – Condução elétrica

O resultado de temperatura para o módulo IGBT da Siemens é apresentado na Figura 47, no instante igual a 2342 s, instante onde o regime permanente já foi atingido. As propriedades térmicas referentes a cada componente deste módulo estão indicadas na Figura 6 e Tabela 4. A malha de elementos finitos utilizada é mostrada na Figura 14. As condições de contorno e fonte térmica para este caso de condução elétrica, onde a corrente elétrica é mantida constante, são mostradas em Figura 21 à Figura 22, da Figura 25 à Figura 30 e Figura 43.

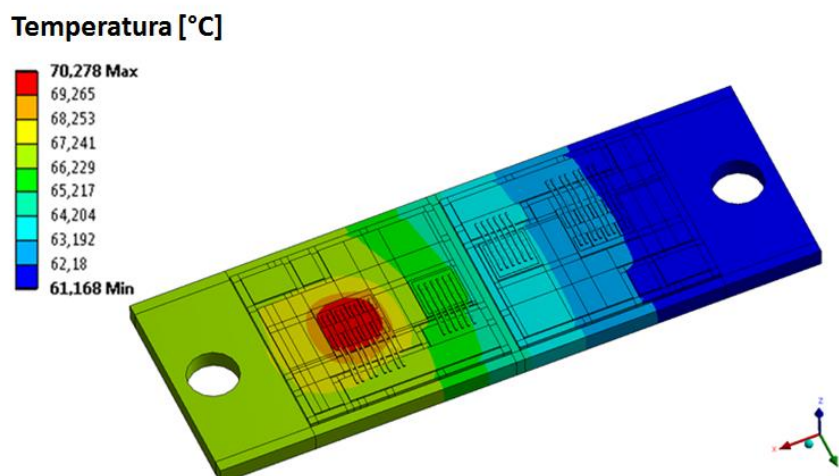


Figura 47 – Resultado da distribuição de temperatura no modelo do módulo IGBT no instante de tempo 2342 s.

A temperatura máxima de 70,278°C, está localizada principalmente nos fios, *pads* e chip IGBT esquerdo, enquanto que a temperatura mínima de 61,168°C é localizada principalmente do lado direito do módulo, onde é a região mais distante da fonte térmica.

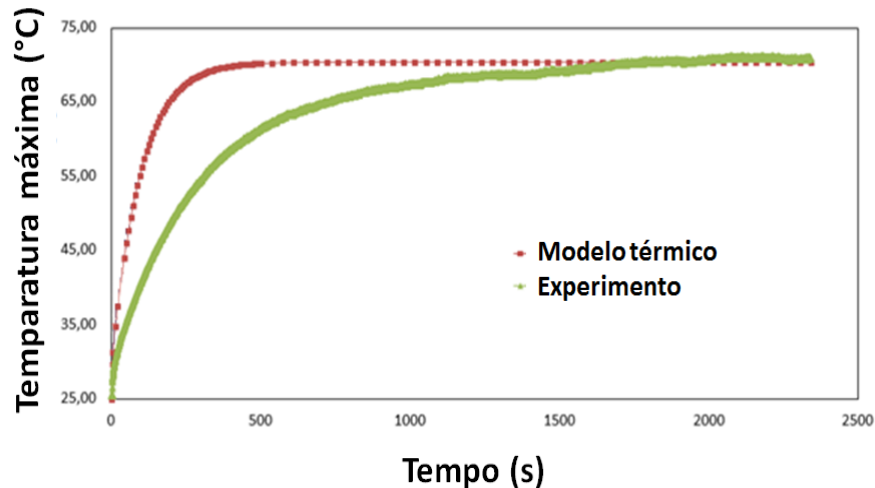


Figura 48 – Comparação entre os resultados do modelo térmico e experimental dos valores de temperatura máxima global ao longo do tempo.

A Figura 48 mostra a comparação entre o resultado experimental Siemens (Caso experimental 2 detalhado no Anexo) e numérico para a temperatura máxima no módulo IGBT da Siemens durante o período de 2342 s. Ao longo deste período, o erro máximo relativo apresentado foi de 16% no instante 158 segundos, uma explicação possível para esta diferença pode ser a falta de informação precisa a respeito das propriedades térmicas de cada componente do módulo. No entanto, uma excelente concordância entre os resultados é observada quando o regime permanente é alcançado, onde a temperatura experimental é de 70,69 °C e a temperatura máxima global da simulação numérica foi de 70,28 °C, representando um erro relativo de 0,58%.

4.2 Módulo IGBT Semikron - Chaveamento

Os resultados numéricos da temperatura para o módulo Semikron operando em chaveamento são mostrados a seguir. As propriedades térmicas referentes a cada

componente deste módulo são indicadas na Figura 7 a Figura 10 e na Tabela 5. A malha de elementos finitos utilizada é mostrada na Figura 17. As condições de contorno e a fonte térmica para este caso de condução elétrica, onde a corrente elétrica não é mantida constante, são mostradas em Figura 23, Figura 31 à Figura 36, Figura 44 à Figura 46 e na Tabela 17.

A Figura 49 mostra a variação da temperatura máxima no módulo IGBT com o tempo, resultado obtido para o Caso 1 de chaveamento, onde foi aplicada uma potência dissipada real, não linear, durante um período de cinco milissegundos. É possível observar um aumento na temperatura de aproximadamente 3% devido ao pico de potência no momento do desligamento da chave.

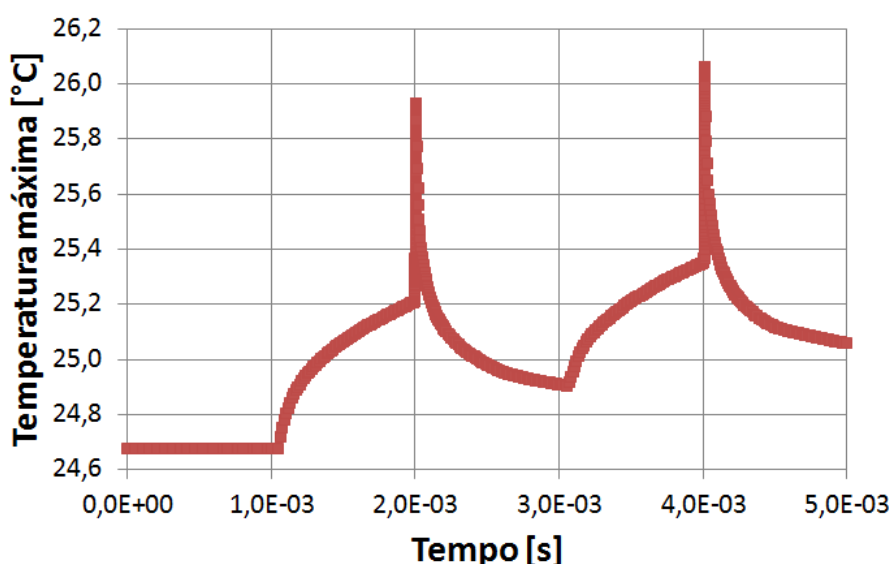


Figura 49 – Temperatura máxima no módulo IGBT Semikron sem dissipador ao longo de cinco milissegundos para o Caso 1 de chaveamento.

As Figura 50 e Figura 51 mostram os resultados referentes ao Caso 2 de chaveamento. Na Figura 50, é mostrada a distribuição de temperatura no módulo IGBT no instante de 6000 segundos, instante em que o estado estacionário térmico já está atingido.

Temperatura [°C]

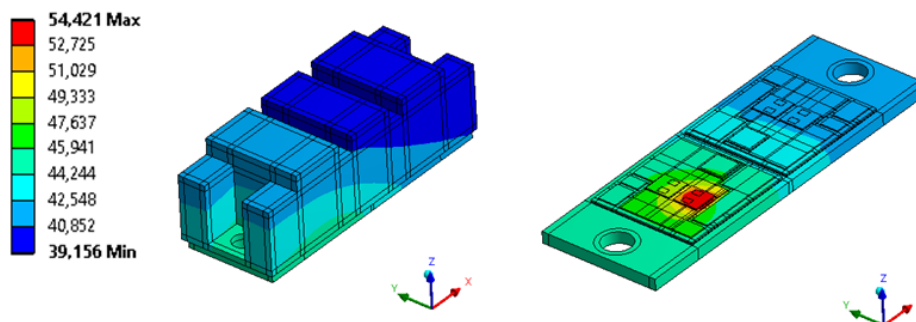


Figura 50 – Distribuição da temperatura no módulo IGBT Semikron sem dissipador no instante 6000 segundos para o Caso 2.

A Figura 51 mostra o resultado para a distribuição de temperatura somente na superfície da base do módulo IGBT no instante de 6000 segundos.

Temperatura [°C]

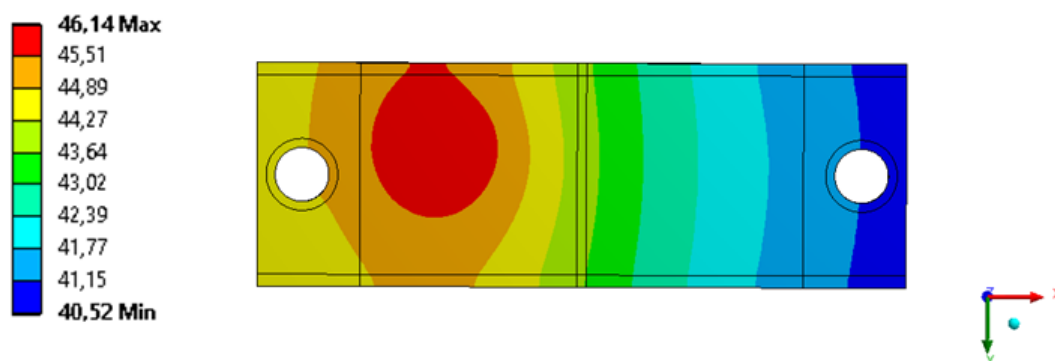


Figura 51 – Distribuição de temperatura na base do módulo IGBT Semikron sem dissipador no instante 6000 segundos para o Caso 2.

Como mostrado na Figura 50, a temperatura máxima atingida no módulo IGBT foi de 54,421°C, e está localizada no chip IGBT onde foi aplicada a potência dissipada.

Na base do módulo IGBT, a temperatura máxima atingida foi de 46,14 °C, a temperatura mínima foi de 40,52 °C e a temperatura média foi de 43,51 °C.

A Figura 52 mostra a comparação ao longo dos 6000 segundos da temperatura média na superfície da base do módulo IGBT obtido pelo Caso 2 numérico e pela câmera termográfica, Caso 1.3 experimental. Na curva do resultado experimental, é mostrada a barra de incertezas experimentais equivalente a 2%.

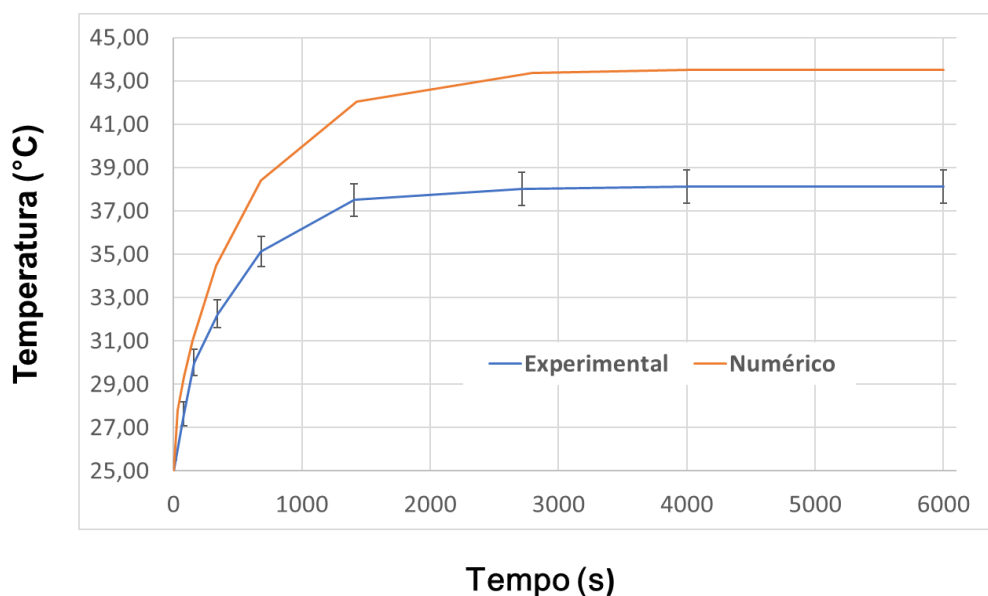


Figura 52 – Comparação ao longo dos 6000 segundos da temperatura média na superfície da base do módulo IGBT Semikron sem dissipador obtido pelo Caso 2 e pela câmera termográfica no experimento Semikron.

A temperatura média na base obtida pela câmera termográfica no estado estacionário foi de 37,77°C, enquanto que a temperatura média na base obtida no Caso 2 foi de 43,51°C, representando um erro relativo máximo de 13 % entre os resultados. Uma explicação possível para esta diferença é a não caracterização dos efeitos elétricos no modelo resolvido.

Os resultados referentes ao Caso 3 do módulo Semikron com dissipador aletado são mostrados a seguir. As propriedades térmicas referentes a cada componente são indicadas na Figura 7 a Figura 11 e na Tabela 5. A malha de elementos finitos utilizada é

mostrada na Figura 20. As condições de contorno e a fonte térmica para este caso de condução elétrica, são mostradas em Figura 24, Figura 37 à Figura 42, Figura 44 e na Tabela 17.

A Figura 53 mostra a temperatura máxima no módulo IGBT com o tempo, resultado obtido para o Caso 3, onde foi aplicada uma potência dissipada constante de 6,5 W durante um período 6000 segundos.

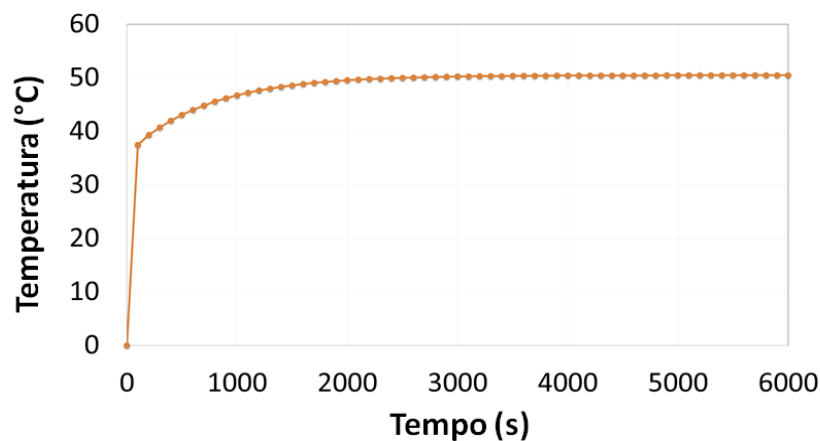


Figura 53 – Temperatura máxima global durante o período de 6000 segundos no módulo Semikron com dissipador.

Na Figura 54 é mostrada a distribuição de temperatura no módulo IGBT no instante de 6000 segundos, instante em que o estado estacionário térmico já está atingido.

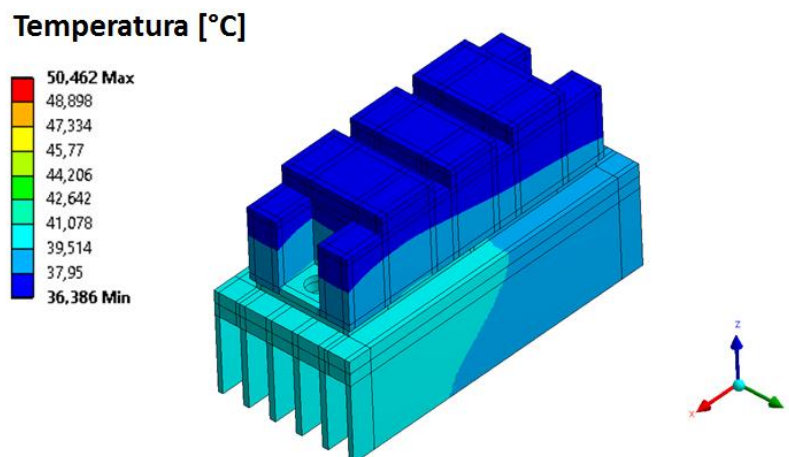
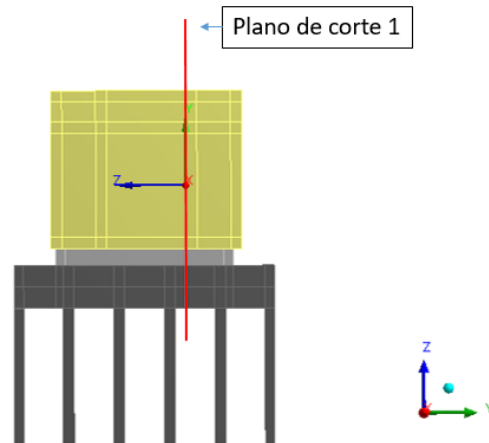


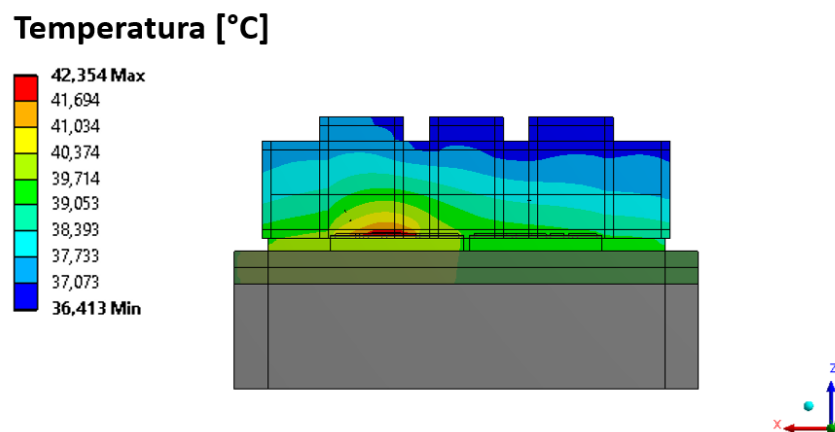
Figura 54 – Perfil de temperatura no módulo Semikron com dissipador no instante 6000 segundos.

A temperatura máxima no módulo foi de 50,46°C no chip IGBT e a temperatura mínima foi de 36,39°C na região do *case*.

Na Figura 55 é indicado o plano de corte 1 e a distribuição de temperatura neste plano.



(a)

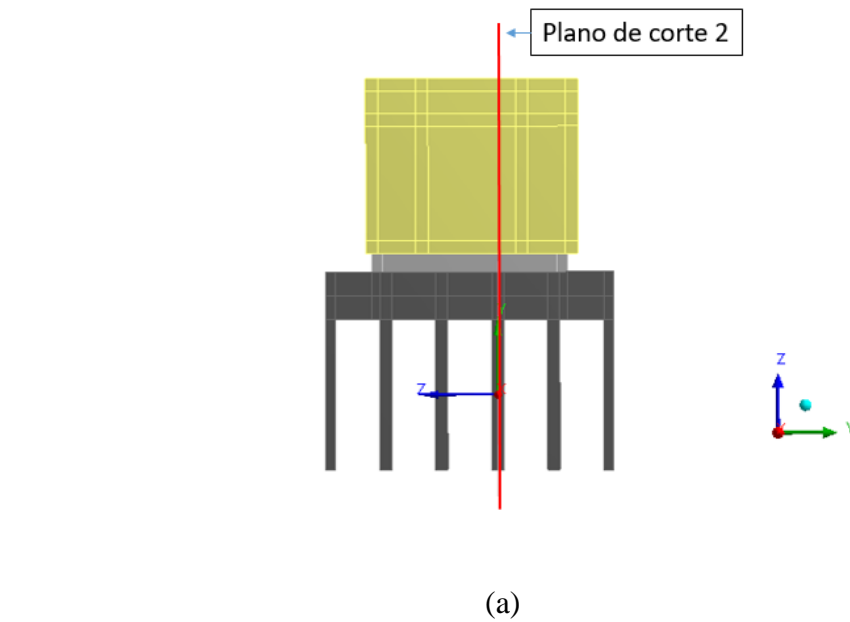


(b)

Figura 55 – (a) Plano de corte 1. (b) Perfil de temperatura na região do plano de corte 1 no instante 6000 segundos no módulo Semikron com dissipador.

A temperatura máxima no plano de corte 1 de 42,35°C na região do chip IGBT e a temperatura mínima foi de 36,41°C na região do *case*.

Na Figura 56 é indicado o plano de corte 2 e a distribuição de temperatura neste plano.



Temperatura [°C]

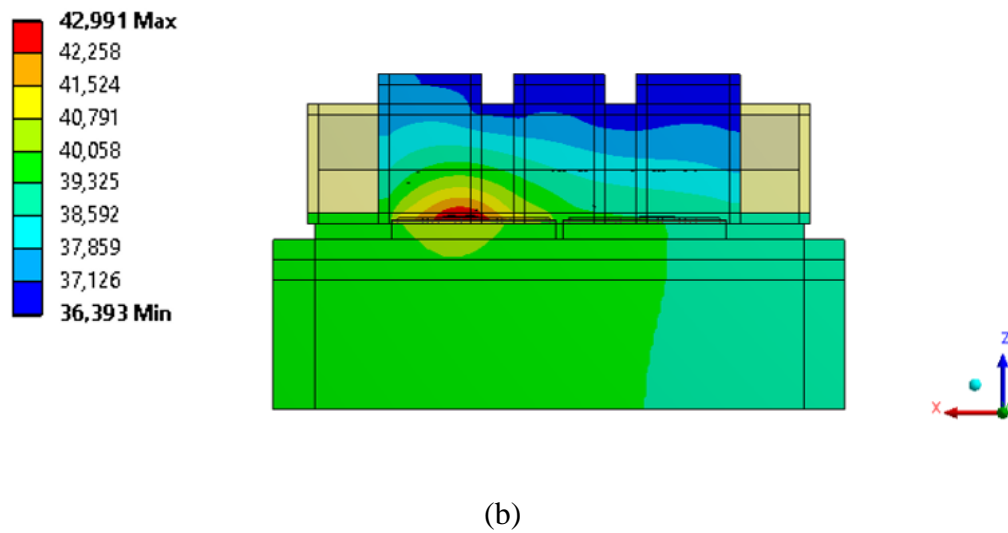
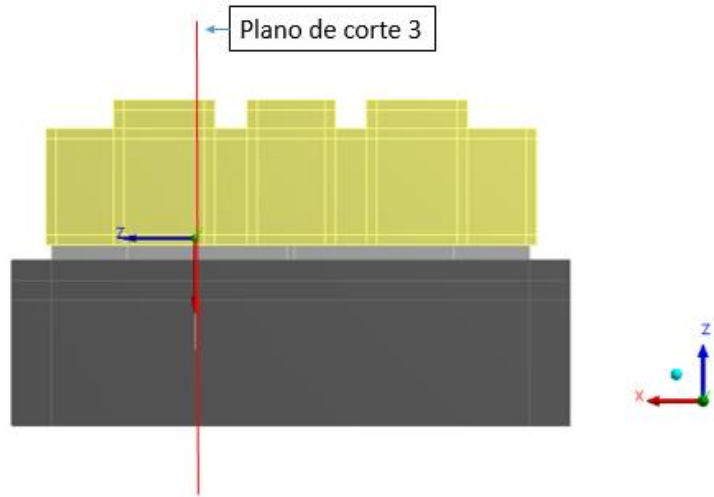


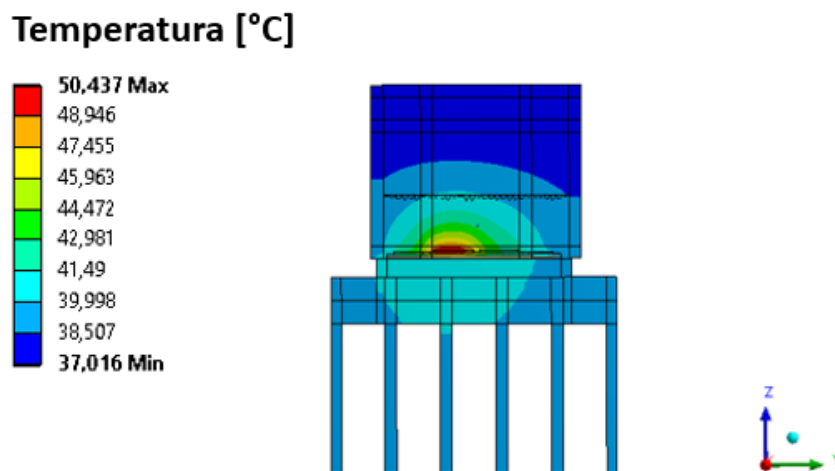
Figura 56 – (a) Plano de corte 2. (b) Perfil de temperatura na região do plano de corte 2 no instante 6000 segundos no módulo Semikron com dissipador.

A temperatura máxima no plano de corte 2 de 42,99°C na região do chip IGBT e a temperatura mínima foi de 36,39°C na região do case.

Na Figura 57 é indicado o plano de corte 3 e a distribuição de temperatura neste plano.



(a)



(b)

Figura 57 – (a) Plano de corte 3. (b) Perfil de temperatura na região do plano de corte 3 no instante 6000 segundos no módulo Semikron com dissipador.

A temperatura máxima no plano de corte 3 de 50,44°C na região do chip IGBT e a temperatura mínima foi de 37,02°C na região do case.

As figuras a seguir mostram os resultados do perfil de temperatura para determinados componentes do módulo IGBT, no instante de 6000 segundos. A Figura 58 mostra a distribuição de temperatura no chip IGBT.

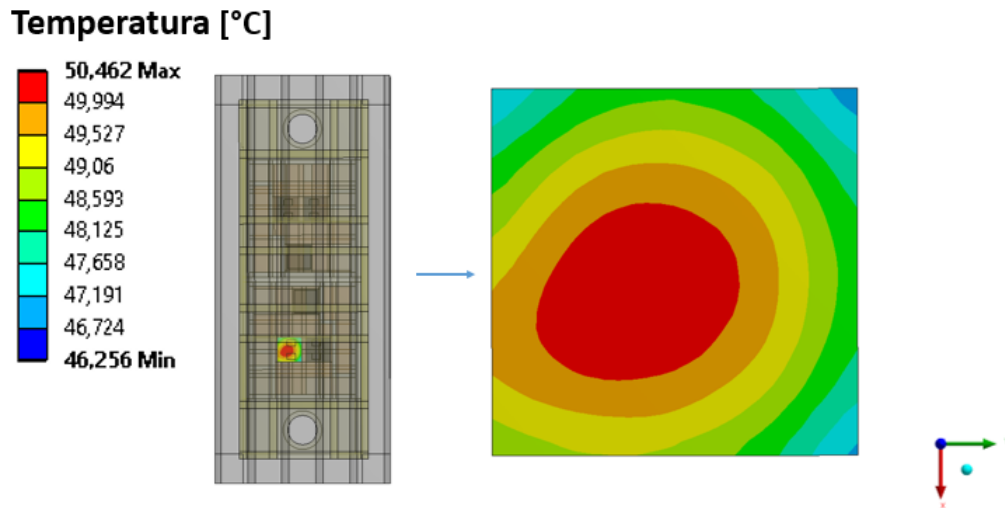


Figura 58 – Perfil de temperatura no chip IGBT do módulo Semikron com dissipador no instante 6000 segundos.

A temperatura máxima no chip IGBT foi de 50,46°C e a temperatura mínima foi de 46,26°C.

A Figura 59 mostra a distribuição de temperatura nas placas de cobre.

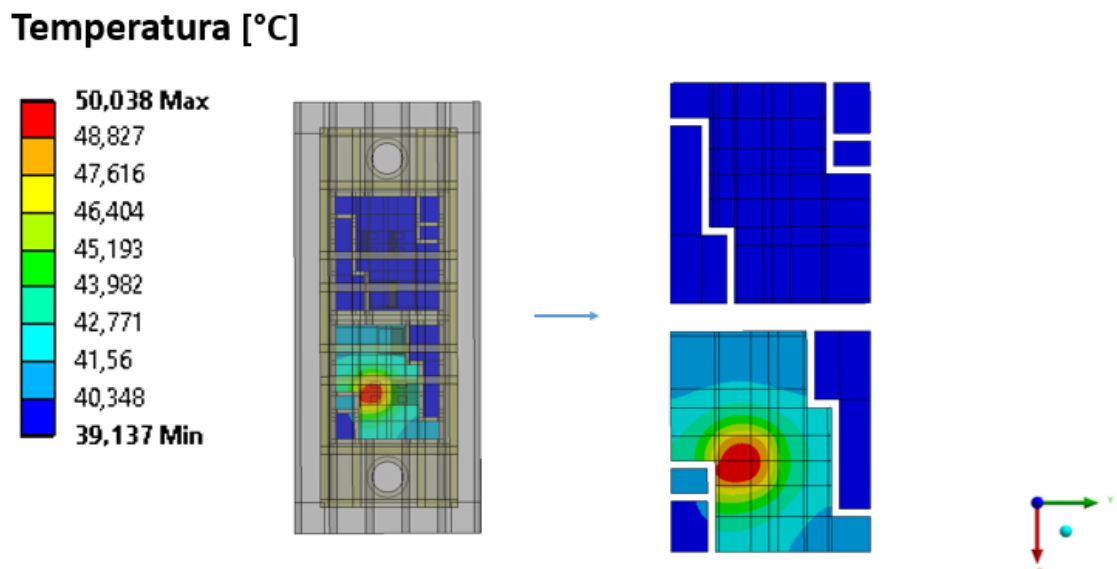


Figura 59 – Perfil de temperatura nas placas de cobre do módulo Semikron com dissipador no instante 6000 segundos.

A temperatura máxima nas placas de cobre foi de 50,04°C e a temperatura mínima foi de 39,14°C.

A Figura 60 mostra a distribuição de temperatura na base.

Temperatura [°C]

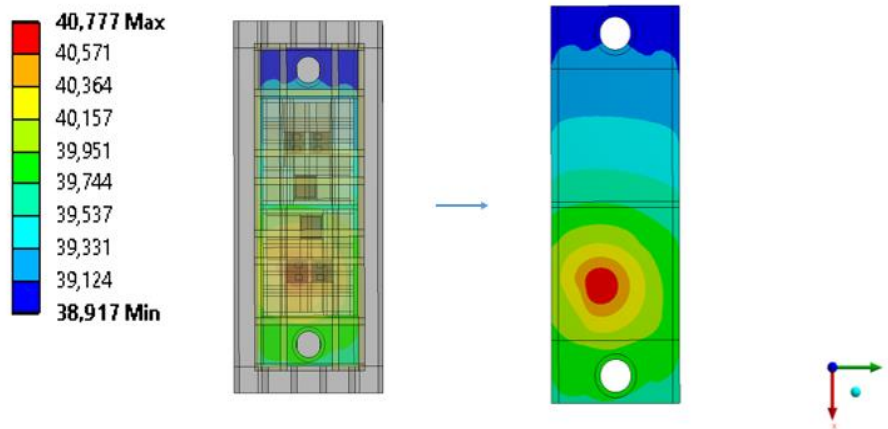


Figura 60 – Perfil de temperatura na base do módulo Semikron com dissipador no instante 6000 segundos.

A temperatura máxima na base foi de 40,78°C e a temperatura mínima foi de 38,92°C.

Figura 61 e a Figura 62 mostram a distribuição de temperatura no dissipador aletado de alumínio em diferentes vistas.

Temperatura [°C]

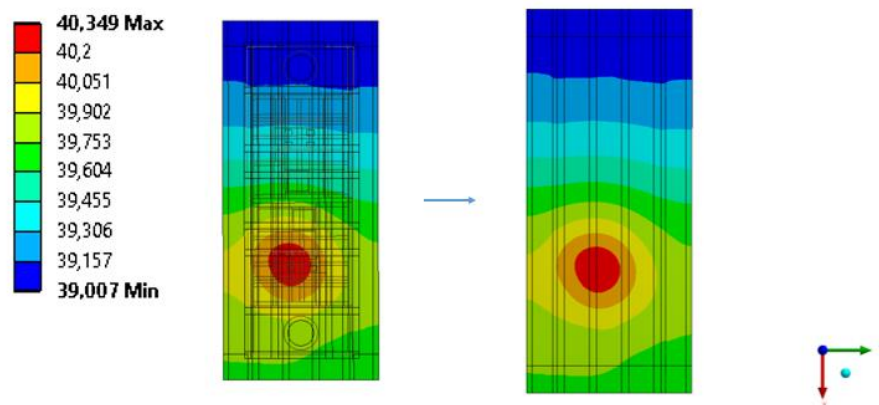


Figura 61 – Perfil de temperatura no dissipador aletado do módulo Semikron com dissipador no instante 6000 segundos – vista 1.

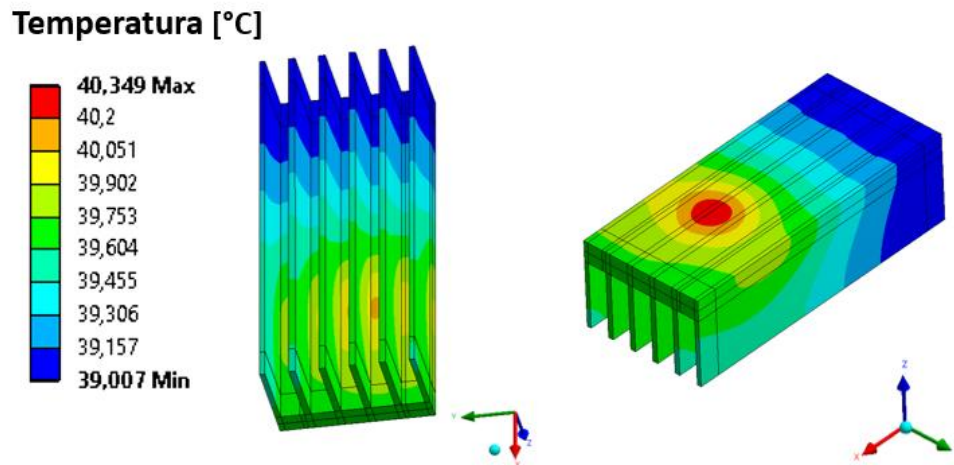


Figura 62 – Perfil de temperatura no dissipador aletado do módulo Semikron com dissipador no instante 6000 segundos – vista 2.

A temperatura máxima no dissipador aletado foi de 40,35°C e a temperatura mínima foi de 39,01°C.

Ao compararmos os resultados obtidos no Caso 2 e no Caso 3, observou-se uma diminuição da temperatura máxima global encontrada no módulo Semikron SKM 50GB 123D, no Caso 2 a temperatura máxima foi de 54,42°C enquanto que no Caso 3 a temperatura máxima foi de 50,46°C, mesmo que a potência dissipada utilizada no Caso 3 (6,5 W) tenha sido maior que a potência dissipada no Caso 2 (5 W). Isso indica a significativa influência do dissipador aletado na distribuição de temperatura no módulo.

A temperatura de junção máxima permitida é aproximadamente 150°C de acordo com o fabricante [33], caso o chip IGBT ultrapasse a temperatura máxima de junção, pode ocorrer um mal funcionamento do IGBT. A temperatura máxima obtida no IGBT, para o Caso 3 foi de aproximadamente três vezes menor do que a temperatura crítica, indicando que a temperatura de operação do módulo está abaixo da temperatura crítica de operação e não ocorrerá a falha por conta temperatura de operação.

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação apresenta a análise térmica de dois módulos IGBTs, a saber o módulo Siemens, estudado aberto (*sem o componente housing* e sem dissipador) e operando na condição de condução e o módulo Semikron, estudado fechado (*com o componente housing*) e fechado com o dissipador aletado, operando na condição de chaveamento. Para isso, descreveu-se inicialmente a equação de condução de calor em sólidos, assim como as devidas condições de contorno e condição inicial.

O problema formulado foi resolvido por meio do método de elementos finitos utilizando o software ANSYS Workbench. Primeiramente foi necessário obter as características dimensionais e propriedades físicas de cada componente dos módulos IGBTs estudados. Foram utilizados resultados experimentais apresentados no Anexo deste trabalho para validar o modelo.

Na modelagem da transferência de calor por convecção natural, buscou-se correlações dependentes da temperatura e com uma faixa de Rayleigh compatível com as condições de operação e geometria dos IGBTs. Além disso, foi considerada a perda de calor por radiação, tornando-o mais custoso computacionalmente, entretanto mais preciso em relação aos resultados experimentais.

Posto isso, um modelo térmico transiente capaz de fornecer a distribuição de temperatura de um módulo IGBT foi elaborado. Este modelo pode ser utilizado com o objetivo de estimar a temperatura de junção dos chips e nortear modificações no projeto elétrico e no projeto de dissipadores térmicos, com objetivo de mitigar as falhas em dispositivos semicondutores de potência.

Propõe-se para trabalhos futuros, o estudo térmico de dispositivos semicondutores de potência imersos em outros fluidos além do ar, como por exemplo em

água e fluidos complexos, e analisar a influência da posição e orientação espacial destes módulos, com o objetivo de avaliar a eficiência da dissipação de calor.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WOLPERT, D.; AMPADU, P., **Managing temperature effects in nanoscale adaptive systems**. Springer Science & Business Media, 2011.
- [2] SHENG, K., FINNEY, S. J., WILLIAMS, B. W. “Thermal stability of igt high- frequency operation”, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 47, n. 1, pp. 9–16, 2000.
- [3] HEFNER JR, A. R., “A dynamic electro-thermal model for the igt”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 30, n. 2, pp. 394–405, 1994.
- [4] LIAO, L.-L., HUNG, T.-Y., LIU, C.-K., *et al.*, “Electro-thermal finite element analysis and verification of power module with aluminum wire” **Microelectronic Engineering**, v. 120, pp. 114–120, 2014.
- [5] CASTELLAZZI, A., CIAPPA, M., “Multi-level electro-thermal modeling for circuit simulation of packaged power devices”. In: **11th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics**, pp 1-6. IEEE, 2008.
- [6] WU, W., GAO, G., DONG, L., *et al.*, “Thermal reliability of power insulated gate bipolar transistor (igbt) modules”. In: **Twelfth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium**, pp. 136–141, 1996.
- [7] PALMER, P. R., SANTI, E., HUDGINS, J. L., *et al.*, “Circuit simulator models for the diode and igt with full temperature dependent features” **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 18, n. 5, pp. 1220–1229, 2003.
- [8] LUO, Z., 2002, *A thermal model for igt modules and its implementation in a real time simulator*. Ph.D. dissertation, University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- [9] LUO, Z., AHN, H., NOKALI, M., “A thermal model for insulated gate bipolar transistor module”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 19, n. 4, pp. 902–907, 2004.
- [10] HUANG, H., 2012, *Lifetime prediction for power converters*. Ph.D. dissertation, University of Warwick, Coventry, West Midlands, UK.
- [11] REDDY, G., REDDY, L., 2014, *Lifetime estimation of igtbs in a grid-connected STATCOM*. Ph.D. dissertation, University of Tennessee, Knoxville, Tennessee, USA.

- [12] SHENG, K., WILLIAMS, B. W., FINNEY, S. J., “A review of igbt models”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 15, n. 6, pp. 1250–1266, 2000.
- [13] HEFNER JR, A. R., “A dynamic electro-thermal model for the igbt”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 30, n. 2, pp. 394–405, 1994.
- [14] KÖCK, H., EISER, S., KALTENBACHER, M., “Electrothermal multiscale modeling and simulation concepts for power electronics”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 31, n. 4, pp. 3128–3140, 2016.
- [15] LU, B., HUDGINS, J., BRYANT, A., SANTI, E., “Expanded thermal model for igbt modules”. In: **Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting**, v. 2, pp. 777–784, 2006.
- [16] SWAN, I. R., BRYANT, A. T., MAWBY, P. A., “Fast thermal models for power device packaging”. In: **2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting**, pp. 1–8. IEEE, 2008.
- [17] SWAN, I. R., BRYANT, A. T., MAWBY, P. A., “Fast 3d thermal simulation of power module packaging”, **International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields**, v. 25, n. 4, pp. 378–399, 2012.
- [18] SWAN, I. R., BRYANT, A., PARKER-ALLOTEY, N.-A., *et al.*, “3-d thermal simulation of power module packaging”. In: **2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition**, pp. 1247–1254, 2009.
- [19] BRYANT, A., PARKER-ALLOTEY, N.-A., HAMILTON, D., *et al.*, “A fast loss and temperature simulation method for power converters, part i: Electrothermal modeling and validation”, **IEEE transactions on power electronics**, v. 27, n. 1-2, pp. 248–257, 2012.
- [20] SWAN, I., BRYANT, A., MAWBY, P., *et al.*, “A fast loss and temperature simulation method for power converters, part ii: 3-d thermal model of power module”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 27, n. 1, pp. 258–268, 2012.
- [21] ROHSENOW, W. M., Hartnett, J. P., Cho, Y. I., **Handbook of heat transfer**. McGraw-Hill, New York, 1998.
- [22] OZISIK, M.N., **Heat Transfer – A Basic Approach**. McGraw Hill, New York, 1985.
- [23] KREITH, F., Berger, S. A. "Mechanical Engineering Handbook Ed. Frank Kreith Boca Raton: CRC Press LLC, 1999". In: **Intelligent Transportation Systems**, v. 10, 1999.

[24] BATARD, C. *et al.*, “Lumped Dynamic Electrothermal Model of IGBT Module of Inverters”, **IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology**, v. 5, n. 3, pp. 355-364, 2015.

[25] D'EGMONT, P. R., NAVEIRA-COTTA, C. P., DIAS R. F., *et al.*, “Experimental-theoretical thermal and electrical analyses of insulated gate bipolar transistors (IGBT) power module”. In: **16th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)**, pp.339-346, 2017.

[26] HEFNER R., BLACKBURN, D. L., “An analytical model for the steady-state and transient characteristics of the power insulated-gate bipolar transistor”, **Solid-State Electronics**, v. 31, n. 10, pp. 1513-1532, 1988.

[27] HEFNER, A. R., “An improved understanding for the transient operation of the power insulated gate bipolar transistor (IGBT),” **IEEE transactions on power electronics**, v. 5, n. 4, pp. 459-468, 1990.

[28] KIM, H. S., CHO, Y. H., KIM, S. D., Y. I *et al.*, “Parameter extraction for the static and dynamic model of IGBT”. In: **24th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference - PESC'93 Record.**, pp. 71-74, 1993.

[29] OZIEMKIEWICZ, G. T., *Implementation and Development of the NIST IGBT Model in a SPICE-based Commercial Circuit Simulator*. Master Thesis, University of Florida, Gainesville, Florida, USA, 1995.

[30] KARLSSON, J., *The Concept of IGBT Modeling and the Evaluation of the PSPICE IGBT Model*. Master Thesis, Industrial and Electrical Engineering and Automation (IEA), 2002.

[31] LIAO, L. L., HUNG, T. Y., LIU, C. K., *et al.*, “Electro-thermal finite element analysis and verification of power module with aluminum wire”, **Microelectronic Engineering**, v. 120, pp. 114-120, 2014.

[32] OCCHIONERO, M. A., FENNESSY, K. P., ADAMS, R. W., *et al.*, “Alsic baseplates for power IGBT modules: design, performance and reliability”. In: **Proceedings of Process Conversion Intelligent Motion**, v. 172, 2002.

[33] *Application Manual Power Semiconductors* - SEMIKRON International GmbH, Germany. W.

[34] MINKINA W., DUDZIK, S., **Infrared Thermography: Errors and Uncertainties**, John Wiley & Sons, New York, 2009.

[35] JAFFERJI, M., **Infrared Thermography applied to the tensile testing of Plastics.** University of Massachusetts Lowell, 2010.

7 ANEXO

7.1 EXPERIMENTOS

Medidas de temperatura com sensores de contato, como por exemplo termopares, são por vezes de difícil execução uma vez que a introdução de um sensor no meio a ser caracterizado pode causar uma perturbação significativa no mesmo. Tal perturbação requer que o sensor seja modelado como parte do sistema, causando dificuldades adicionais na análise do problema térmico. A resolução espacial das câmeras termográficas na faixa do infravermelho já atinge hoje valores inferiores a 20 μm de comprimento de onda. Portanto, a termografia por câmera de infravermelho se apresenta como uma técnica não-intrusiva, de alta definição, pequena incerteza e vasta aplicabilidade.

A radiação na faixa do infravermelho (IR, do inglês “infrared”) é uma parte da radiação eletromagnética cujo comprimento de onda é maior que o da luz visível ao olho humano. O infravermelho é uma frequência eletromagnética naturalmente emitida por qualquer corpo, com intensidade proporcional à sua temperatura. A termografia de infravermelho é a técnica que possibilita a formação de imagens térmicas de um objeto e consequentemente a obtenção da distribuição de temperaturas, a partir da radiação térmica na faixa do infravermelho que emana da superfície deste objeto.

Os infravermelhos se subdividem em infravermelhos curtos (0.7 – 5 μm), infravermelhos médios (5 – 30 μm) e infravermelhos longos (30 – 1000 μm). Entretanto, esta classificação não é precisa porque em cada área de utilização se tem uma ideia diferente dos limites dos diferentes tipos. A Figura 63 ilustra as diferentes faixas de radiações no espectro eletromagnético, corresponde à faixa do espectro entre aproximadamente 100 μm e 0.1 μm .

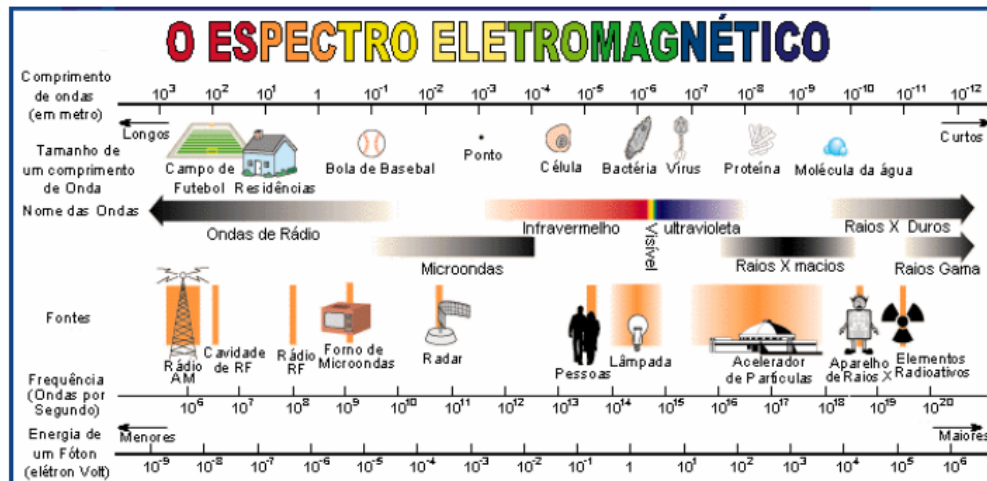


Figura 63 – Ilustração do espectro eletromagnético.

Um detector ou sensor de radiação térmica na faixa do infravermelho é um transdutor de energia eletromagnética, isto é, um dispositivo que converte a energia térmica radiante incidente sobre o mesmo em alguma outra forma conveniente de sinal mensurável, geralmente, um sinal elétrico. Analisando-se o mecanismo físico envolvido no processo de detecção pode-se estabelecer duas categorias distintas de detectores: os detectores quânticos e os detectores térmicos.

No caso dos detectores térmicos, a energia eletromagnética absorvida provoca o aquecimento do dispositivo. Isto provoca a alteração de alguma propriedade do material que é função da temperatura e pode ser mensurada por uma medida direta da temperatura (calorimetria), ou pela mudança na resistência elétrica do material, ou um sinal de corrente ou tensão termoelétrica ou ainda pela alteração de carga ou capacitância do dispositivo.

Este tipo de detector apresenta uma resposta proporcional à energia incidente, sendo praticamente independente do comprimento de onda da radiação. Devido à inércia térmica dos processos de absorção e troca de calor, este tipo de sensor apresenta tempos de resposta relativamente longos (>10 ms). Em geral esses detectores não precisam de

refrigeração, facilitando o seu uso em diversas aplicações de campo com menor custo operacional. Os principais tipos de detectores térmicos são: a Termopilha, o Detector Piroelétrico e o Bolômetro.

Detectores do tipo bolômetro tratam-se basicamente de um termoresistor, isto é, de um dispositivo cuja resistência elétrica varia com a temperatura. Pode ser construído tanto a partir de metais (dispositivos clássicos) quanto com semicondutores (dispositivos modernos) que apresentem dependência significativa da resistência elétrica com a temperatura. Existe ainda uma terceira categoria de materiais conhecidos como termistores que são compostos por óxidos mistos e vem sendo utilizados com sucesso na construção de bolômetros.

A câmera de infravermelho que será aqui empregada na análise experimental é a câmera A645Sc25° da FLIR, que possui um detector térmico do tipo microbolométrico não resfriado de óxido de vanádio com um faixa espectral de 7.5-13 μm .

A câmera utilizada nos experimentos, mostrada na Figura 64, é o modelo A645Sc25° fabricada pela Flir Systems para comprimentos de onda longos (entre 7,5 à 13 μm), com temperatura de trabalho da câmera entre -15 e 50°C e de medição na faixa 0°C a 650°C. A A645Sc25° utiliza detectores de microbolômetros de óxido de vanádio de 17 microns.

A lente da A645Sc25° tem padrão de distância focal de 0,25 m com campo de visão de 25° por 19° e uma resolução espacial de 0,68 mRad, ou seja, de 0,17mm/pixel para o ensaio de 25 cm de distância. A Tabela 18 a seguir apresenta algumas das especificações técnicas da A645Sc25° e a Figura 64 mostra a câmera.



Figura 64 – Câmera de infravermelhos de FLIR modelo A645Sc25°.

Tabela 18 – Especificações técnicas da câmera A645Sc25°.

A645Sc25°		
Dados Ópticos	Resolução do Infravermelho	640x480 pixels
	Campo de visão/mínima distancia de foco	25°x19°/0,25 m
	Resolução espacial	0,68 mRad
	Frequência de aquisição	25 Hz
	Foco	Automático ou manual
Dados de Operação	Amplitude de temperatura de trabalho da câmera	-15°C a 50°C
	Amplitude de temperatura da amostra	-40°C a 650°C
Dados Físicos	Dimensões	216 x 73 x 75 mm
	Peso	0,9 kg

Dois módulos IGBT foram estudados, a saber: Siemens BSM 50GB 120 DN2 e Semikron SKM 50GB 123D.

7.1.1 Módulo IGBT Siemens

Nos ensaios experimentais que serão aqui apresentados, o módulo IGBT comercial Siemens BSM 50GB 120 DN2, foi ensaiado aberto, ou seja, sem a sua cobertura de plástico e o seu gel isolante termoeletrico, de modo a permitir a realização

das medidas de temperatura diretamente nos chips IGBT ou diodo. A seguir, a bancada experimental, os equipamentos utilizados e o procedimento experimental são apresentados.

7.1.1.1. Bancada experimental e equipamentos

Os principais componentes desta bancada experimental são: 1) uma câmara infravermelha, 2) um osciloscópio, 3) um multímetro, 4) a unidade IGBT, 5) um ventilador, 6) uma sonda de corrente e 7) duas fontes de alimentação. O módulo IGBT comercial utilizado, Siemens BSM 50GB 120 DN2, mostrado na Figura 65, é constituído por dois sub-módulos, cada um constituído de um chip IGBT e um diodo posicionados simetricamente ao longo de um eixo central ambos montados em base metálica de 90mm x 30 mm. Para realização dos experimentos e medição das distribuições de temperatura, a unidade IGBT foi aberta e separada da sua caixa de plástico, como ilustrado na Figura 65a.

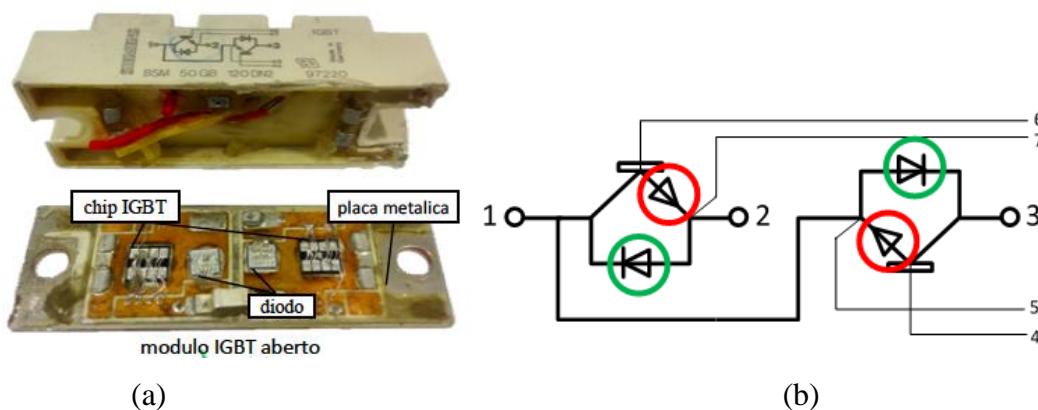


Figura 65 – O módulo IGBT (Siemens BSM 50GB 120DN2 módulo duplo) aberto, depois de desconectado da caixa plástica (a) e diagrama do circuito da unidade IGBT (b). As unidades IGBTs estão circulados em vermelho e os diodos estão circulados em verde.

A superfície do circuito foi pintada com tinta spray a base de grafite (Graphit 33, Kontakt Chemie, Suíça) para uniformizar e tornar conhecida a emissividade desta superfície, que é de 0,97, como ilustrado no detalhe da Figura 66, com o objetivo de obter

os dados com maior precisão. A unidade IGBT aberta foi fixada na bancada experimental com os componentes do circuito voltados para cima. A distribuição espacial da temperatura nesta face foi medida pela câmera de infravermelho. Seis fios foram soldados nos pontos de conexão no circuito correspondendo aos três coletores/emissores (pontos 1, 2 e 3 na Figura 65) e os dois *gates* (pontos 4, 5, 6 e 7 na Figura 65) e os fios foram conectados diretamente às fontes de alimentação.



Figura 66 – Bancada experimental e em detalhe o módulo IGBT aberto e pintado com tinta à base de grafite.

7.1.1.2. Procedimento experimental

Medições de temperatura da superfície dos componentes da unidade IGBT foram realizadas utilizando a câmera infravermelha FLIR A645Sc25° com uma frequência de 25 quadros por segundo. A câmera A645Sc25° foi fixada 25cm acima da unidade IGBT, como mostrado na Figura 66.

Uma fonte de alimentação (item 7 da Figura 66) foi regulada em sua máxima tensão e corrente de 34 volts e 3 amperes respectivamente, para fornecer uma tensão estabilizada do *gate* ao emissor (tensão *gate*-emissor, V_{GE}) da unidade IGBT (4→5 e 6→7 na Figura 65b). A outra fonte de alimentação (item 8 da Figura 66) foi usada para fornecer energia do coletor ao emissor (tensão coletor-emissor, V_{CE}) no circuito. Devido à arquitetura do circuito e limitações nas ligações do circuito, apenas um dos componentes pode ser ligado por vez. Tendo em conta essa limitação, um total de três configurações experimentais diferentes (casos 1 a 3 da Tabela 19) foram testadas para se determinar os perfis de temperatura na superfície aberta do módulo do IGBT para o caso de uma tensão constante fornecida ao *gate* e aproximadamente a mesma potência fornecida para cada um dos diferentes componentes individuais dentro do módulo.

O procedimento experimental inicia-se informando à câmera IR alguns parâmetros como: temperatura e umidade do ambiente, emissividade da superfície a ser medida, frequência de aquisição desejada e distância entre lente-objeto. Em seguida é fixado o valor da tensão a ser imposta pela primeira fonte ao módulo IGBT (fonte representada pelo item 7 da Figura 66).

Inicia-se a aquisição das imagens pela câmera de infravermelho e então a segunda fonte de alimentação é ligada permitindo então a passagem da corrente da primeira fonte (fonte representada pelo item 8 da Figura 66) para a unidade IGBT. As temperaturas da superfície foram então medidas até atingir o regime permanente, em um

período de aproximadamente trinta minutos. Uma vez atingido o regime permanente, o sistema de aquisição é encerrado e as fontes são desligadas. As imagens da câmera são devidamente identificadas e salvas para futuras comparações com resultados de simulação numérica. As imagens infravermelhas obtidas pela câmera termográfica são tratadas no software *ResearchIR* da FLIR. Depois de cada experimento, o ventilador (item 5 da Figura 66) foi ligado para ajudar com o resfriamento da unidade IGBT e garantir que a temperatura dos componentes volte à temperatura ambiente antes de começar o próximo experimento.

Três casos foram analisados para determinar o perfil de temperatura sobre a superfície do módulo IGBT. Os três casos estão detalhados na Tabela 19.

Tabela 19 – Tensão aplicada e potência gerada em cada caso experimental 1-3.

Caso	Componentes ligados	Corrente fornecida (A)	Tensão aplicada, V_{CE} (V)	Potência gerada (W)
1	Diodo esquerdo	$6,15 \pm 0,12$	1.0	$6,15 \pm 0,12$
2	IGBT esquerdo	$4,91 \pm 0,10$	1.25	$6,14 \pm 0,12$
3	Diodo direito	$6,16 \pm 0,12$	1.0	$6,16 \pm 0,12$

7.1.1.3. Resultados experimentais - Siemens

Os resultados para a temperatura máxima, apresentados a seguir, foram obtidos em uma área na superfície do módulo IGBT aberto em torno dos chips IGBTs e diodos, designada de 300 x 150 pixels - aproximadamente 4.5 x 104 pixels, equivalente a 51mm x 25.5 mm e a uma distância de lente-objeto de 25cm. Essa área, de 300 x 150 pixels, está identificada na Figura 67.

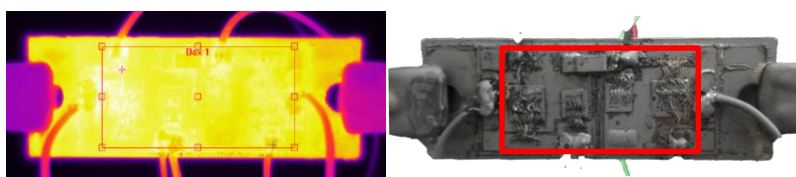


Figura 67 – O módulo IGBT aberto destacando a área designada para análise das medições.

Todos os resultados experimentais apresentados são resultados de um pós-processamento das imagens termográficas no software FLIR ResearchIR. Os valores das temperaturas máximas sobre a superfície da unidade IGBT estão apresentados graficamente ao longo do tempo na Figura 68.

As imagens destacadas na parte superior da Figura 68 são provenientes da câmera termográfica obtidas em diferentes instantes de tempo (5s, 50s e 1500s) para o caso 2. Nestas imagens, a localização da região de maior temperatura é indicada com uma flecha vermelho enquanto que a região com a menor temperatura é indicada com uma flecha azul.

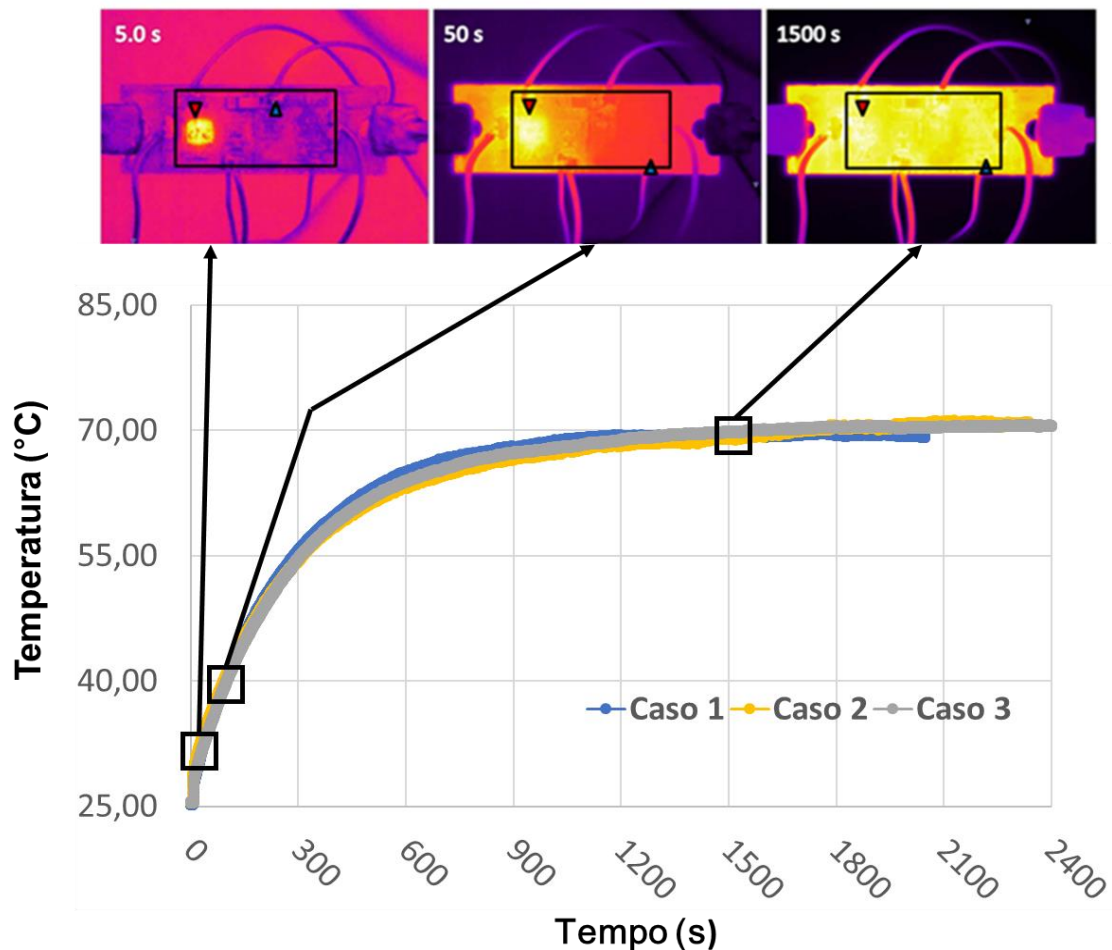


Figura 68 – Temperatura máxima na superfície da unidade IGBT ao longo do tempo para os casos experimentais 1, 2 e 3.

As temperaturas máximas atingidas no regime permanente para as três configurações, caso 1-3, onde os componentes (o diodo do lado esquerdo, chip IGBT do lado esquerdo e diodo do lado direito, respectivamente) foram testados individualmente, com potências de $6.15 \pm 0.12\text{W}$, $6.14 \pm 0.12\text{W}$ e $6.16 \pm 0.12\text{W}$ respectivamente, obtiveram temperaturas máximas semelhantes, de $69,19^{\circ}\text{C}$, $70,69^{\circ}\text{C}$ e $70,19^{\circ}\text{C}$ respectivamente, dentro do erro de 2% da câmera.

Os pontos de máxima temperatura, no regime transiente e no regime permanente, foram identificados e correlacionados com as posições na superfície do modulo IGBT. A Figura 69 mostra os pontos das máximas e mínimas temperaturas em oito imagens infravermelhas obtidas em diferentes tempos depois de ligado o chip IGBT do lado esquerdo para o caso experimental 3. Em cada imagem, os pontos nos quais as temperaturas máxima e mínima foram medidas são indicados por uma flecha vermelha (máxima) e azul (mínima). A área quente, especialmente no início do processo, coincide com a área do chip IGBT do lado esquerdo. Depois de atingido o regime permanente tem-se uma maior uniformização da temperatura em toda a superfície, todavia as temperaturas mais altas continuam sendo indicadas na região do chip IGBT, como era esperado, por ser a região onde ocorre uma maior dissipação de energia.

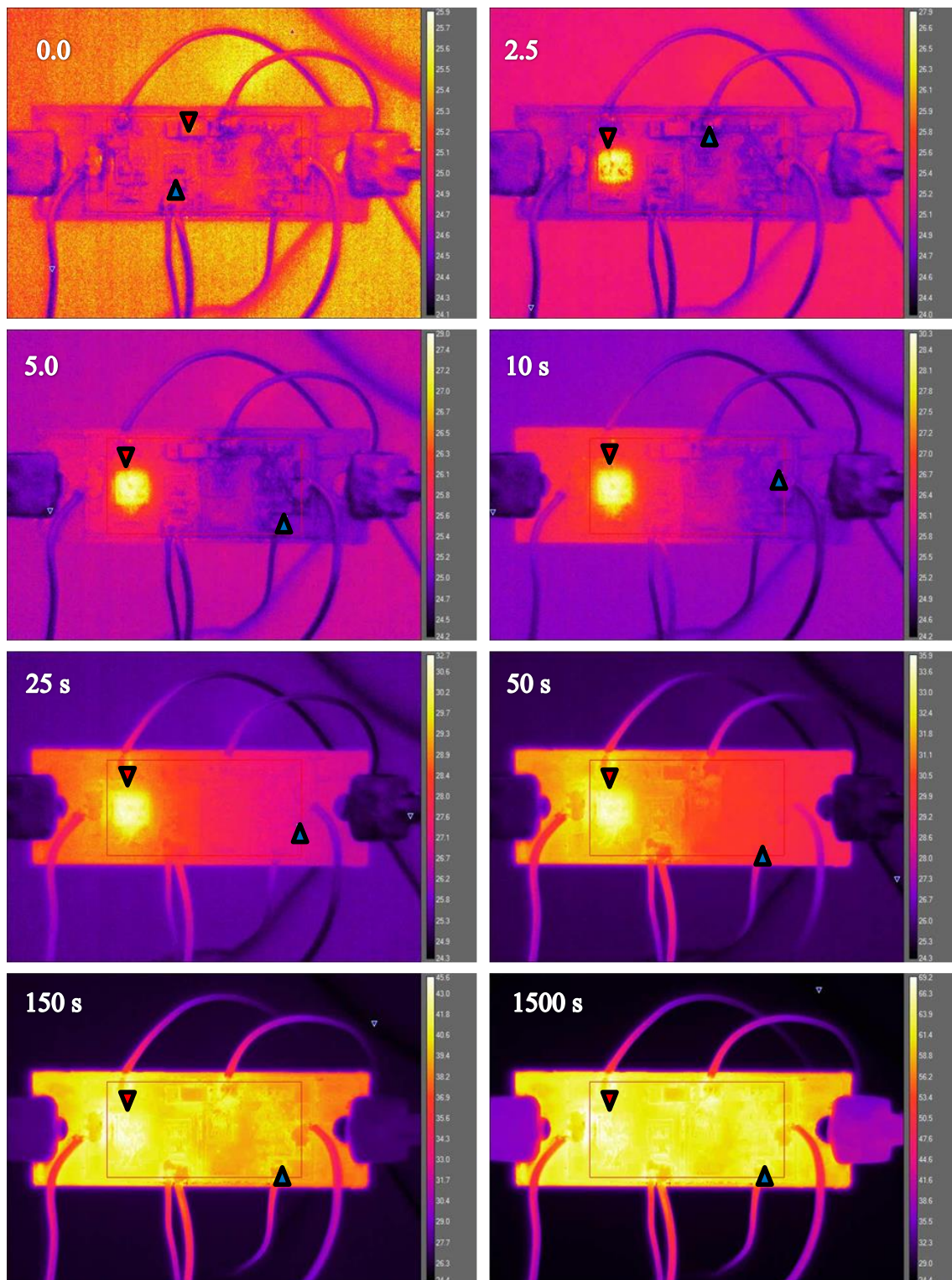


Figura 69 – Pontos das máximas e mínimas temperaturas identificados por meio das imagens infravermelhas em tempos diferentes no caso experimental 3.

7.1.2 Módulo IGBT Semikron

Para este experimento, algumas melhorias foram implementadas referentes à bancada de modo a permitir o ensaio em mais altas potências. Uma outra mudança necessária nos ensaios experimentais foi o fato de que o módulo IGBT comercial Semikron SKM 50GB 123D foi ensaiado sem retirar a caixa de plástico original de fábrica. As distribuições de temperatura foram capturadas na face metálica externa do módulo fechado.

Desta forma os experimentos aqui reportados visam analisar qualitativamente e quantitativamente os dados de temperatura obtidos na face metálica externa em condições de chaveamento e corrente e tensões mais altas.

7.1.2.1. Bancada experimental e equipamentos

A bancada experimental apresentada na Figura 70 foi modificada e testada para realização do experimento que será aqui apresentado. Os principais componentes desta bancada são: duas câmaras infravermelhas (números 1 e 2 na Figura 8), um osciloscópio (número 3), um multímetro (número 4), o módulo IGBT (número 5), um ventilador (número 6), e uma sonda de corrente (número 7). Para o fornecimento de energia e tensão ao módulo IGBT, quatro componentes elétricos foram usados: um banco de resistores de alta potência (número 8), um retificador (número 9), um gerador de função de onda (número 10), e um variac (número 11). O módulo IGBT comercial utilizado (Semikron SKM 50GB 123D), mostrado em mais detalhes na Figura 71.

Número	Equipamento	Função
1	FLIR A645Sc25° Câmara infravermelha	Medir o perfil de temperatura na superfície do circuito da unidade IGBT;
2	FLIR A323Sc25 ° Câmara infravermelha	Medir o perfil de temperatura na superfície da placa metálica da unidade IGBT;
3	Tektronix TDS2014 Osciloscópio	Monitorar a corrente e tensão fornecidos ao IGBT;
4	iCEL MD-6111 Multímetro	Monitorar a temperatura ambiente;
5	IGBT Semikron SKM 50GB 123D	Unidade a ser analisada experimentalmente;
6	Ventilador ADDA 120MM	Esfriar a unidade IGBT, entre experimentos;
7	Fluke 80i-110s sonda de corrente	Medir a corrente elétrica fornecido ao IGBT;
8	Resistores de alta potência (em série)	Controlar a corrente.
9	Retificador	Conversor AC por DC
10	Gerador de forma de onda	Fornecer tensão ao <i>gate</i> (onda quadrada)
11	JNC Variac (0-250V)	Moderar a tensão AC

Figura 70 – Bancada experimental e componentes elétricos usados nos experimentos do Módulo Semikron.

Figura 71A mostra a unidade IGBT inteira, e Figura 71B mostra uma vista explodida de todos os componentes internos da unidade. Figura 71C mostra uma vista de cima da base metálica onde estão colocados todos os componentes do circuito, incluindo os dois chips IGBT e dois diodos. As conexões da fonte de energia para a unidade estão mostradas como coletor 1, emissor 2, e emissor 3, e as conexões do gerador de função para a unidade (para controlar a chaveamento) estão mostradas como *gate* 4, 5, 6 e 7, na

Figura 71D. Neste diagrama, o banco de resistores está representado como uma resistência entre o coletor 1 (ponto 1) e o emissor 3 (ponto 3).

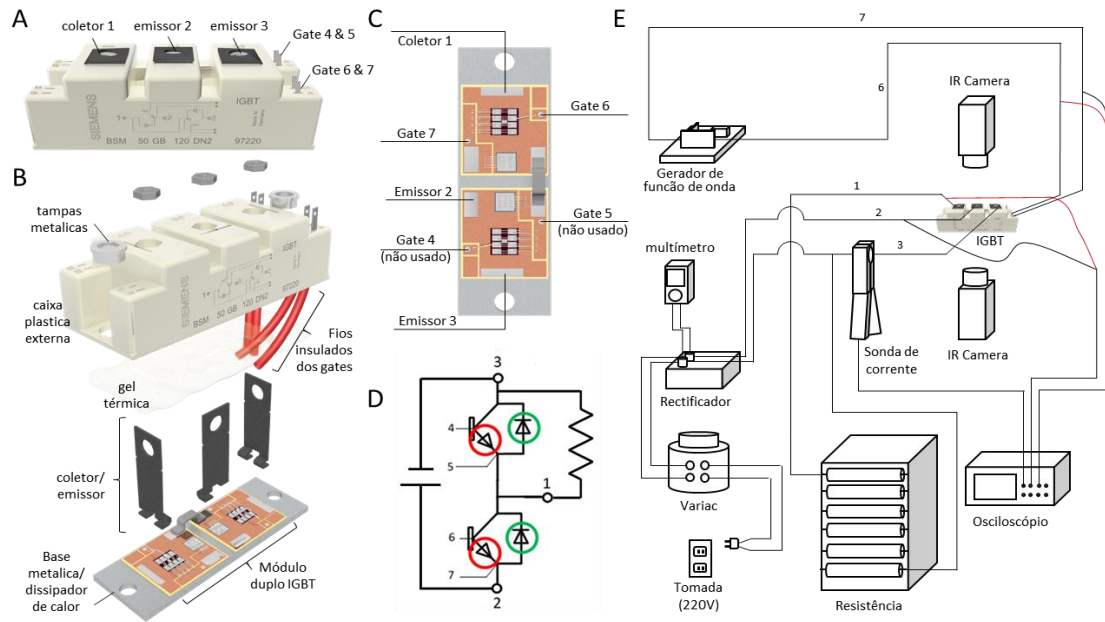


Figura 71 – (A) a unidade IGBT inteira. (B) vista explodida da unidade. (C) vista de cima da base metálica e os componentes elétricos (D) diagrama do circuito e componentes elétricos usados nos experimentos. (E) diagrama das conexões da unidade IGBT com os outros componentes elétricos no experimento

Os IGBTs estão marcados com círculos vermelhos e os diodos com círculos verdes. Como está mostrado no diagrama, uma resistência foi adicionada entre o coletor 1 (ponto 1) e o emissor 3 (ponto 3). Apenas um chip IGBT foi usado durante os experimentos e o *gate* controlando o outro IGBT (pontos 4 e 5) foi realizado como curto circuito para bloquear o percurso da corrente nesse lado da unidade. (E) diagrama das conexões da unidade IGBT com os outros componentes elétricos no experimento

7.1.2.2. Procedimento experimental

Todos os componentes fundamentais dos experimentos e a forma de conexões entre eles estão mostrados na Figura 71D. O fluxograma do procedimento experimental está mostrado na Figura 72. Nesta fase, 3 séries de experimentos diferentes foram

realizados com diferentes tensões coletor-emissor (VCE) e frequências no *gate* do IGBT para comparar os diferentes perfis térmicos produzidos em diferentes condições experimentais. Cada experimento começou conectando o regulador de tensão (variac) a uma fonte de alimentação (uma tomada de 220V CA no laboratório). As câmeras de infravermelho foram ligadas para aquisição contínua das imagens térmicas ao longo dos experimentos. O gerador de função de forma de onda foi ligado e setado para fornecer uma tensão na forma de um pulso quadrado no *gate* IGBT. Um osciloscópio foi utilizado para monitorar continuamente a corrente e a tensão fornecidas ao IGBT, bem como a tensão fornecida ao *gate*. A tensão desejada para o IGBT foi então ajustada usando o variac e a corrente foi imediatamente convertida em corrente contínua pelo retificador e enviada para a unidade IGBT. As distribuições de temperatura em ambas as superfícies, superior e inferior, da unidade IGBT e a tensão e corrente fornecidas ao IGBT durante o chaveamento foram continuamente monitorados ao longo do experimento. Depois de obter uma distribuição de temperatura em regime permanente nas superfícies da unidade IGBT, as formas de onda da tensão, corrente e tensão do *gate* foram anotadas e o experimento é terminado.



Figura 72 – Fluxograma ilustrativo do procedimento experimental.

Os parâmetros experimentais específicos para cada série de experimentos estão descritos na Tabela 20. Nos experimentos aqui realizados a faixa de tensão selecionada para VCE foi de 100-150V, por precauções de segurança e devido a limitações na infraestrutura do laboratório. Para cada série de experimentos realizou-se três réplicas experimentais de modo a permitir a análise estatística dos dados e a quantificação das incertezas. Nestes experimentos, todas as medições de tensão foram feitas com um osciloscópio (Tektronix TDS2014) com erro de medição máximo de 3.0%. Todas as medições de corrente foram feitas com uma sonda de corrente (Fluke 80i-110s) com erro de medição máximo de 3.0% + 50mA. Assim, os cálculos das potências levaram uma propagação da incerteza de (no máximo) 9%. Além dos valores para tensões, corrente, resistência e frequências usadas nos experimentos, a Tabela 20 também fornece exemplos das formas de onda para VCE, ICE e VGE registradas após atingido o regime permanente da distribuição de temperatura. Pode-se notar um exemplo da forma global de um período completo da forma de onda, o detalhe do tempo de subida da forma de onda de pulso quadrado no *gate* e o detalhe do tempo de queda da forma de onda de pulso quadrado no *gate*. Nestes experimentos, as tensões de 100V e 150V para VCE foram escolhidas de modo a permitirem duas potências altas e diferentes dentro dos limites dos equipamentos (variac e retificador). A resistência de ~23 Ohm foi escolhida de modo a aumentar a corrente no módulo, para a faixa de tensão no *gate* de [+15V, -5V] foi seguida de acordo com a recomendação do fabricante do módulo, e a frequência de 500 e 1000 Hz.

Tabela 20 – Parâmetros dos Experimentos

Caso Experimental	Repetição	componente usado	Potência alimentada				Características do gate			
			Tensão definida, $V_{CE, gate}$ aberto (V)	Tensão, $V_{CE, gate}$ fechado (V), (regime permanente)	Corrente média, $I_{CE, gate}$ fechado (A), (regime permanente)	Resistência (Ohm)	Função	Tensão no gate, V_{GE} (V)	Frequência (Hz)	Tempo de subida (t_{on}) e descida (t_{off})
1	1.1	IGBT fechado de SEMIKRON (chip do lado esquerdo)	~100	$1,7 \pm 0,05$	$4,3 \pm 0,18$	22,9	Pulso quadrado	[15V, -5V]	500	~2000ns
	1.2			$2,0 \pm 0,06$	$4,5 \pm 0,19$					
	1.3			$2,0 \pm 0,06$	$4,5 \pm 0,19$					
2	2.1			$2,4 \pm 0,07$	$4,2 \pm 0,18$				1000	
	2.2			$2,3 \pm 0,07$	$4,4 \pm 0,18$					
	2.3			$2,4 \pm 0,07$	$4,3 \pm 0,18$					
3	3.1		~150	$2,0 \pm 0,06$	$6,5 \pm 0,25$					
	3.2			$2,2 \pm 0,07$	$6,3 \pm 0,24$					
	3.3			$2,0 \pm 0,06$	$6,3 \pm 0,24$					
Ex. 1.1 →										
Ex. 2.1 →										
Ex. 3.1 →										

7.1.2.3. Chaveamento no *gate*

O chaveamento do chip IGBT foi realizado aplicando uma tensão na forma de onda de pulso quadrado através do *gate* apropriado usando um gerador de onda com uma placa de circuito SKHI 20opA. A Figura 73 ilustra as principais características da forma de onda de pulso quadrado. A amplitude da forma de onda do impulso quadrado permaneceu constante na Figura 71D quando é aplicada uma tensão positiva no *gate* e para de conduzir (desliga) na direção de avanço e conduz 20V para todos experimentos com um desvio de -5V, resultando numa tensão positiva máxima próxima de +15V e uma tensão mínima de -5V. A unidade IGBT selecionada conduz na direção de avanço do circuito mostrado na direção inversa quando é aplicada uma tensão negativa. Assim, selecionou-se um intervalo de modo a assegurar que o *gate* estava totalmente aberto quando o impulso era positivo e completamente fechado quando a tensão era negativa. A largura de pulso foi igual a metade do período de pulso e dependia, portanto, da frequência de pulso empregada, que foi ajustada em 500Hz (largura de pulso = 1,0 ms) para o caso experimental 1 (Tabela 20) e em 1000Hz (largura de pulso = 0,5ms), para os casos experimentais 2 e 3 (Tabela 20). A amplitude, medida pelo osciloscópio, foi constante para ambas as frequências e o tempo de subida (de -5V a 15V) e descida (de 15V a -5V) foi de aproximadamente 2000ns cada um, visualizados pela onda (Tabela 20).

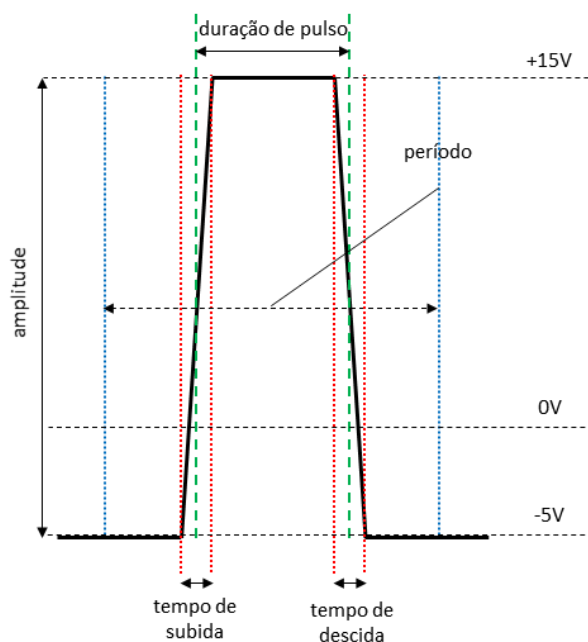


Figura 73 – Características da forma de onda (pulso quadrado) de tensão no gate V_{GE} .

7.1.2.4. Resultados experimentais - Semikron

Os resultados experimentais térmicos do módulo Semikron mostram os valores máximos, médios e mínimos da temperatura superficial medida da placa base da unidade IGBT ao longo da duração de cada experimento.

Os resultados térmicos são mostrados na Figura 74, Figura 75 e Figura 76. Em cada uma das figuras, os regimes permanentes foram atingidos após aproximadamente 2000 s, e todas as temperaturas do regime permanente foram determinadas pela média de mais de 1000 pontos de dados entre os pontos de tempo 2500 s e 3500 s. A Figura 74 mostra os resultados térmicos para a série 1 em que todas os experimentos foram operados a uma frequência de chaveamento de 500 Hz e uma tensão fixa (gate aberto) de aproximadamente 100 V. Como esperado, esta série de experimentos produziu as temperaturas mais baixas em relação aos experimentos da série 2 e 3, apresentando as temperaturas máximas dos experimentos 1.1, 1.2 e 1.3 como 37.85 °C, 39.30 °C e 38.81 °C, respectivamente. As temperaturas mínimas na superfície da placa base metálica

ficaram próximas das temperaturas máximas como 35,95 ° C, 37,92 ° C e 36,86 ° C, respectivamente, indicando uma boa dispersão de calor na placa de base.

A Figura 75 mostra os resultados térmicos para a série 2 em que a tensão fixa (gate aberto) permaneceu a 100 V, mas a frequência de chaveamento foi aumentada para 1 KHz. Aumentar a frequência de chaveamento resulta em um número maior de transições do estado ligado (*power on*) e desligado (*power off*), o que gera mais energia dissipada. Como esperado, este aumento na frequência resultou num pequeno aumento nas temperaturas da superfície observada. Para os experimentos 2.1, 2.2 e 2.3, as temperaturas superficiais máximas foram 38,30 ° C, 40,28 ° C e 39,84 ° C, respectivamente, aproximadamente 1 °C acima das temperaturas observadas para os experimentos da série 1.

Finalmente, os experimentos da Série 3 foram conduzidos com uma frequência de chaveamento de 1KHz e uma tensão fixa (gate aberto) mais elevada de 150V. Uma vez que a resistência permaneceu constante, esta tensão fixa (gate aberto) mais elevada permitiu uma passagem de uma corrente ligeiramente maior, em relação as outras séries, através do IGBT durante a condução. Este valor de corrente mais elevado aumentou a potência gerada dentro do IGBT em todas as etapas do ciclo de chaveamento e como esperado os perfis de calor refletiram este fato. As temperaturas máximas observadas na superfície da placa de base metálica para os experimentos 3.1, 3.2 e 3.3 foram de 49.34 °C, 48.67 °C e 50.94 °C, respectivamente, aproximadamente 10 °C acima das temperaturas observadas para os experimentos da série 1, como mostrado na Figura 76.

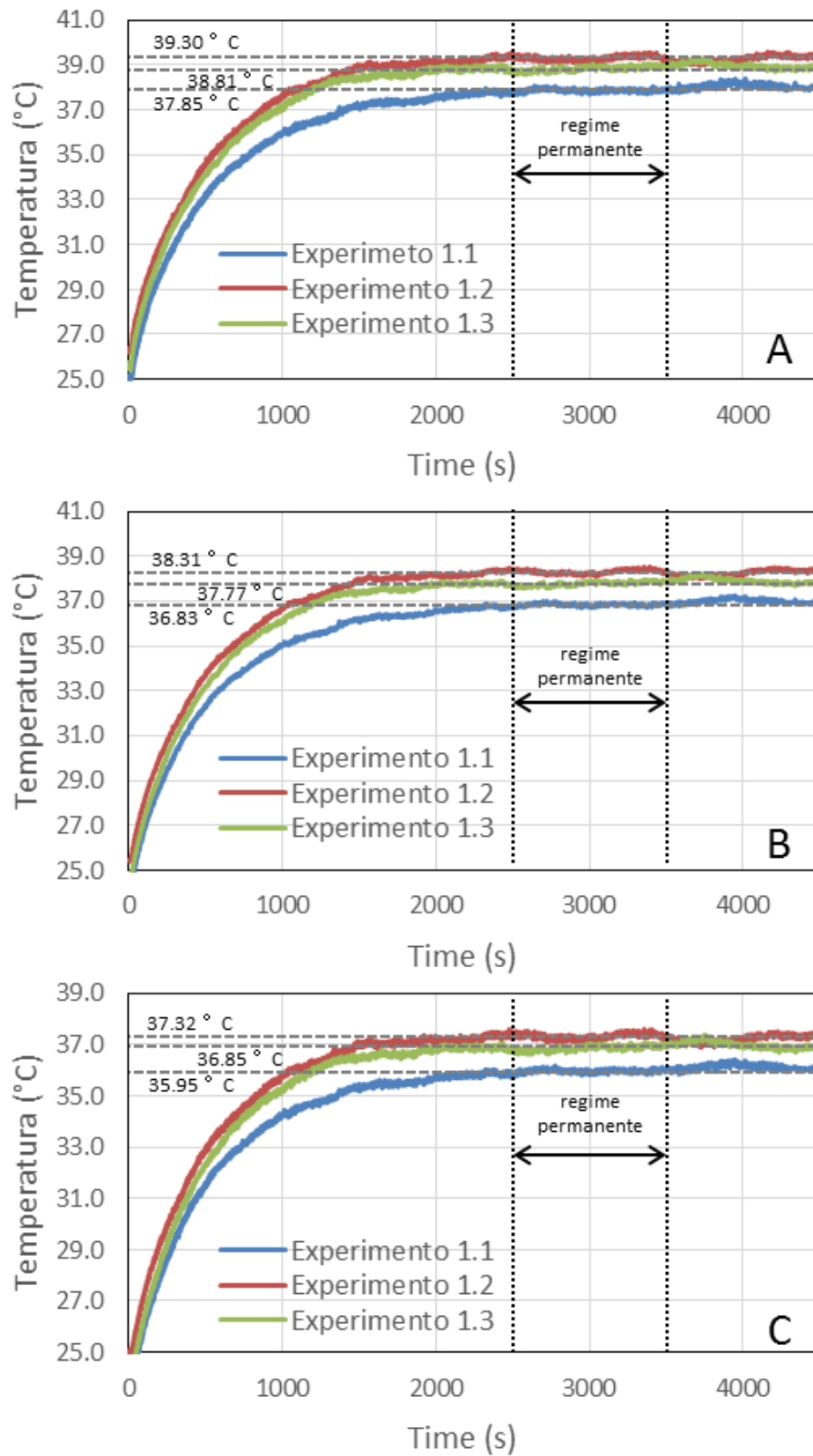


Figura 74 – As temperaturas máximas (A), médias (B), e mínimas (C) da série 1.

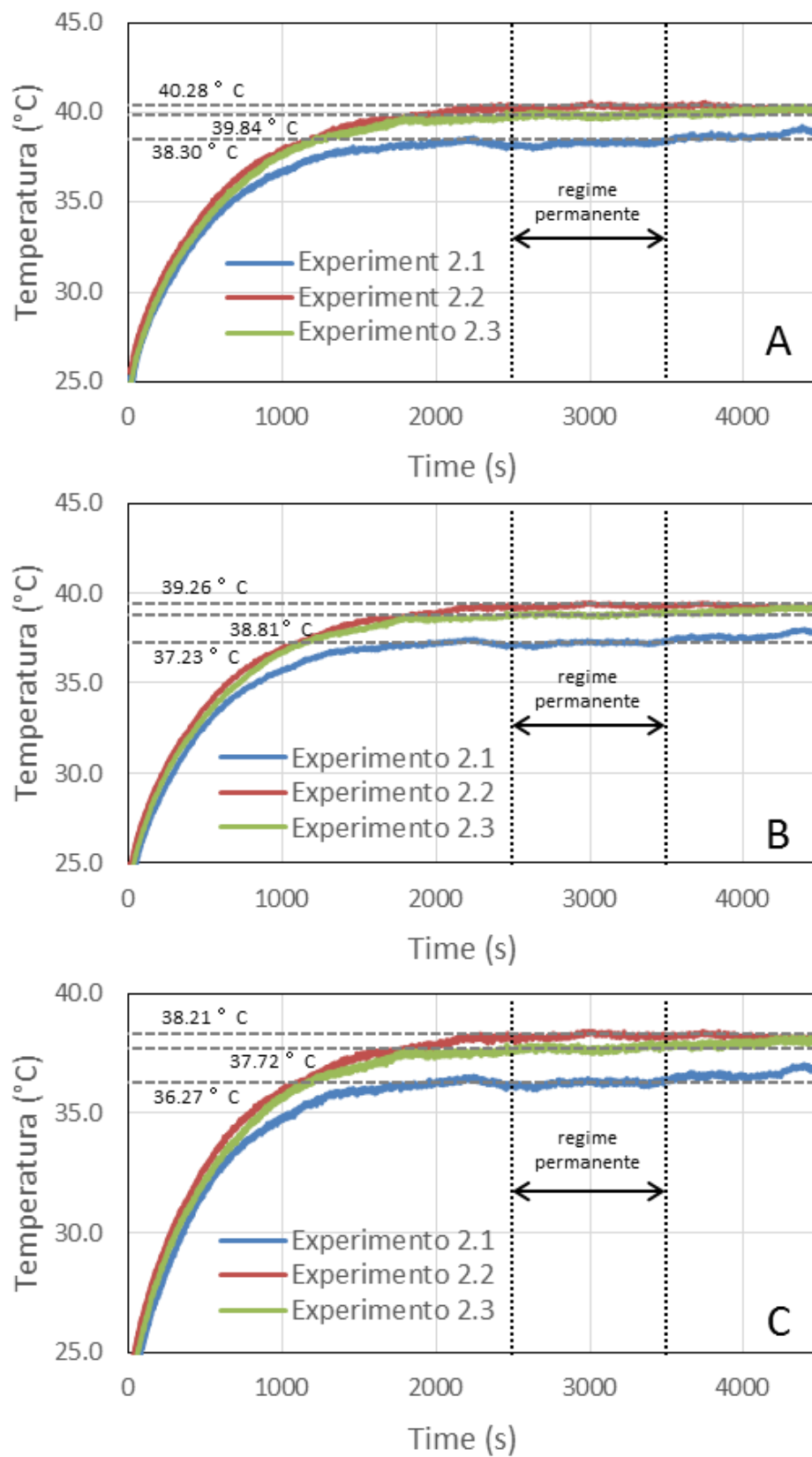


Figura 75 – As temperaturas máximas (A), médias (B), e mínimas (C) da série 2.

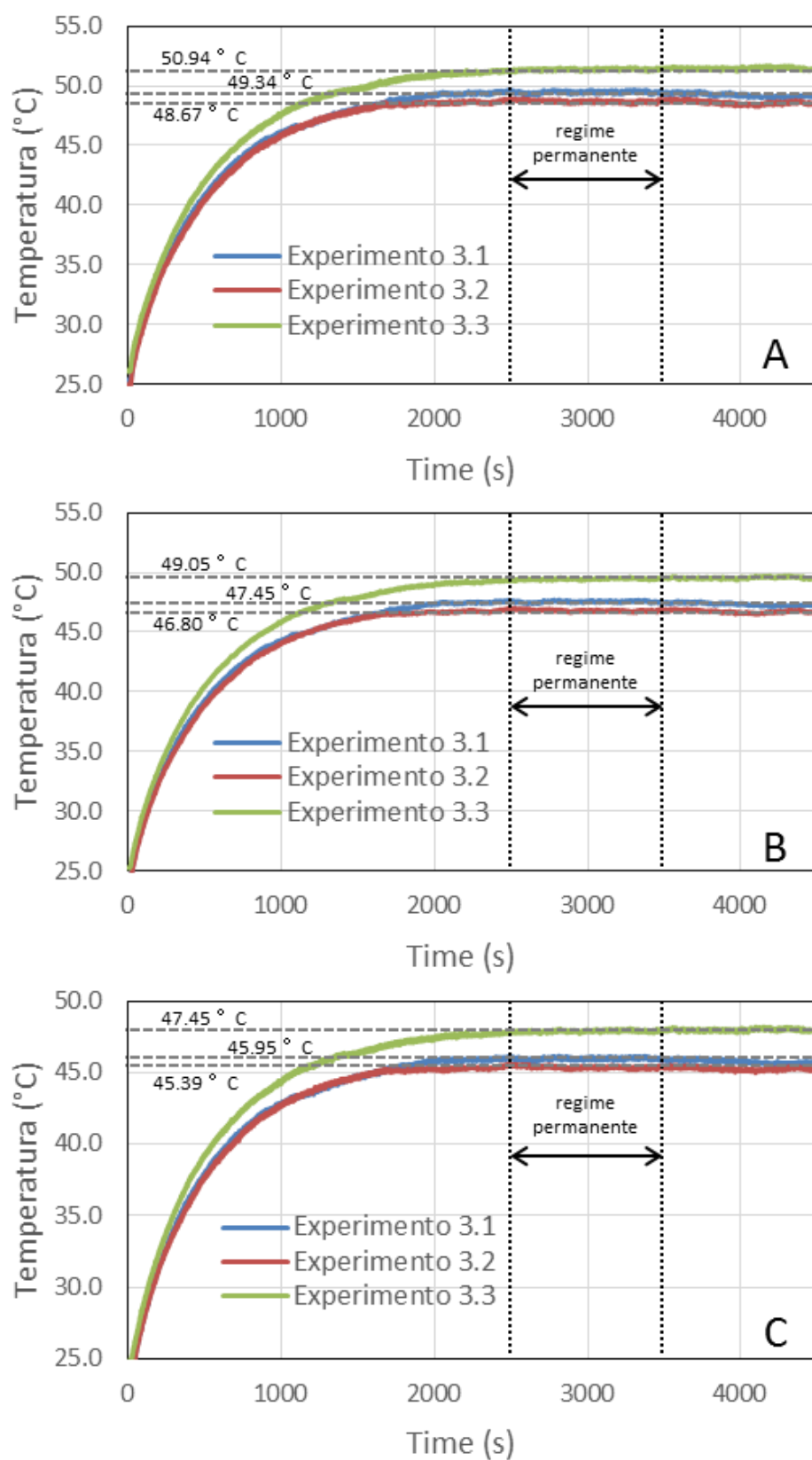


Figura 76 – As temperaturas máximas (A), médias (B), e mínimas (C) da série 3.